



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA SUSUNAN
ULTRACAPACITOR DENGAN VARIASI *HEAT FLUX*
DAN *REYNOLDS NUMBER***

CHRISTOPHER GUNAWAN
2113 100 118

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani Djanali, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**NUMERICAL STUDY FLOW CHARACTERISTIC
AND HEAT TRANSFER ON ULTRACAPACITOR
STACK WITH HEAT FLUX AND REYNOLDS
NUMBER VARIATIONS**

CHRISTOPHER GUNAWAN
2113 100 118

Advisor Lecturer:
Vivien Suphandani Djanali, ST., M.Eng., Ph.D.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA SUSUNAN
ULTRACAPACITOR DENGAN VARIASI HEAT FLUX
DAN REYNOLDS NUMBER**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada





Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

CHRISTOPHER GUNAWAN

NRP. 2113 100 118

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. VIVIEN SUPHANDANI DJANALI
ST., M.Eng., Ph.D
NIP. 198105292003122001  (Pembimbing)
2. Dr. WAWAN ARIES WIDODO
ST.MT
NIP. 197104051997021001  (Penguji I)
3. Prof. Dr. Eng. PRABOWO, M.Eng
NIP. 196505051990031005  (Penguji II)
4. Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng, Ph.D
NIP. 196412281990031002  (Penguji III)

SURABAYA

JULI, 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA SUSUNAN
ULTRACAPACITOR DENGAN VARIASI *HEAT FLUX*
DAN *REYNOLDS NUMBER***

Nama Mahasiswa : Christopher Gunawan
NRP : 2113 100 118
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, ST.,
M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Ultracapacitor adalah sebuah komponen penyimpan energi elektrokimia yang reversibel. Penggunaan *ultracapacitor* sering dijumpai pada penyimpanan energi listrik dengan densitas energi yang tinggi seperti otomotif, pembangkit listrik dengan tenaga angin dan industri. Pada dunia otomotif, *ultracapacitor* digunakan sebagai penyedia daya pada mobil listrik dan digunakan untuk proses start up pada mesin. Pada pembangkit listrik dengan tenaga angin, *ultracapacitor* berfungsi sebagai *power electronic conditioner* pada turbin angin untuk meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan. Penggunaan pada dunia industri sebagai penyedia daya darurat.

Pada penggunaannya *ultracapacitor* sering mengalami aging akibat dari kenaikan temperatur sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada *ultracapacitor*. Oleh karena itu digunakan suatu sistem pendinginan untuk membantu menjaga temperature kerja *ultracapacitor*, dan untuk sistem yang paling mudah adalah dengan *forced air cooling* dimana media pendinginnya adalah udara. Dengan melakukan penelitian ini,

maka dapat diketahui debit kipas yang aman untuk digunakan serta arus listrik yang diijinkan untuk bekerja pada *ultracapacitor*.

Dalam penelitian ini, *ultracapacitor* dimodelkan dalam 3D model dan akan dilakukan simulasi dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) Star CCM+. Penelitian dimodelkan dengan kondisi *steady, segregated flow, ideal gas, incompressible flow, turbulence model K- ϵ Standard, K- ϵ Realizable* dan *K- ϵ Standard Low – Re*. Didapatkan hasil pada bilangan Re 24000 *ultracapacitor* dapat bekerja secara aman pada arus listrik 80A dan 90A, sedangkan pada arus listrik 100A *ultracapacitor* tidaklah aman. Dari ketiga model turbulensi yang digunakan cocok pada bilangan Re rendah, terutama pada model *K- ϵ Standard Low – Re*, sedangkan untuk bilangan Re tinggi direkomendasikan adalah *K- ϵ Realizable*. Variasi bilangan Re memberikan perubahan yang signifikan pada temperatur maksimum, koefisien perpindahan panas konveksi dan Cd.

Kata Kunci: *Ultracapacitor, Bilangan Re, Temperatur maksimum, Koefisien perpindahan panas konveksi, Cd.*

NUMERICAL STUDY FLOW CHARACTERISTIC AND HEAT TRANSFER ON ULTRACAPACITOR STACK WITH HEAT FLUX AND REYNOLDS NUMBER VARIATIONS

Name : Christopher Gunawan
NRP : 2113 100 118
Departement : Mechanical Engineering ITS
**Advisor Lecturer : Vivien Suphandani Djanali, ST.,
M.Eng., Ph.D.**

ABSTRACT

Ultracapacitor is a reversible electrochemical energy storage device. The use of ultracapacitor can be found in machine that need to store high density energy, such as automotive, wind energy powerplant and industry. In automotive, it can used as energy storage in electrical car and it is used to start – up engine. Ultracapacitor also used as electronic conditioner to improve the quality power extracted on wind turbine. In industry, it can be used as emergency power supply.

In the use of ultracapacitor, aging often occurs in consequence of the increase of temperature that causes the destruction of ultracapacitor. Because of that, a cooling system that capable to maintain the working temperature, and the most common and easy to use is forced air cooling with air as the cooling media. By doing this research, then the volumetric flow rate of the fan will be known and the allowable electric current that ultracapacitor can withstand

In this research, the ultracapacitor will be modeled as 3-D and simulated by using Computational Fluid Dynamics software Star CCM+. The research modeled as steady, segregated flow, ideal gas, incompressible flow, turbulence model K- ϵ Standard, K- ϵ Realizable and K- ϵ Standard Low – Re. the results are: at Reynolds Number 24000 is safe for electric current magnitude 80A dan 90A, but not for 100A. From 3 turbulence model, the turbulence model in Star CCM + is suitable for low Reynolds number cases, especially for K- ϵ Standard Low – Re nad for high Reynolds number K- ϵ Realizable model is recommended. By varying the Reynolds Number, it will give significant changes for maximum temperature, convection heat transfer coefficient and Cd

Key words: Ultracapacitor, Reynolds Number, Maximum temperature, Convection heat transfer coefficient, Cd

KATA PENGANTAR

Salam sejahtera,

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa dalam memberikan berkat dan perlindungan-Nya. Sehingga atas kuasa-Nya penulis diijinkan untuk menyelesaikan penulisan tugas akhir yang berjudul: “**Studi Numerik Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas pada Susunan *Ultracapacitor* dengan Variasi *Heat Flux* dan *Reynold Number*”**”.

Dengan segala hormat, penulis mengucapkan rasa terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Ibu Vivien Suphandani Djanali selaku pembimbing yang memberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan tugas akhir
2. Dosen – dosen departemen teknik mesin ITS yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama menempuh studi
3. Keluarga yang penulis yang memberikan dukungan dan doa dalam kelancaran penyelesaian tugas akhir
4. Rekan satu bimbingan yang telah menjadi alumni dalam membantu pengerjaan serta memberi saran
5. Rekan - rekan lab mekanika fluida yang menyemangati penulis dan membuat kondisi lab menyenangkan
6. Rekan – rekan lab perpindahan panas yang memotivasi penulis dalam mengerjakan tugas akhir

7. Teman – teman angkatan 2013 dan seluruh karyawan teknik mesin ITS.

Semoga apa yang tertuang dalam tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapa pun yang membacanya.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.**Error! Bookmark not defined.**

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
NOMENKLATUR	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Ultracapacitor</i>	5
2.2 <i>Heat Transfer</i>	7
2.2.1 Konduksi	8
2.2.2 Konveksi.....	10
2.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)	13
2.4 Model K- ϵ	14
2.5 Penelitian Terdahulu	16

2.5.1 Studi numerik analisis karakteristik aliran dan perpindahan panas pada susunan <i>ultracapacitor</i> dengan <i>forced air cooling</i>	16
2.5.2 <i>On Estimating Instantaneous Temperature of a Supercapacitor String Using an Observer Based on Experimentally Validated Lumped Thermal Model</i>	18
2.5.3 <i>Supercapacitor Thermal Modelling and Characterization in Transient State for Industrial Application</i>	23
2.5.4 <i>Thermal Network Model of Supercapacitor</i>	25
2.5.5 <i>Study on the Cooling System of super-capacitors for Hybrid Electric Vehicle</i>	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 <i>Pre – Processing</i>	33
3.1.1 <i>Modelling</i>	33
3.1.2 <i>Pembuatan Meshing dan Pengaturan Boundary Condition</i>	37
3.1.3 <i>Setup</i>	40
3.2 <i>Processing</i>	42
3.3 <i>Post – Processing</i>	42
3.4 <i>Flowchart Penelitian</i>	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 <i>Grid independency</i>	45
4.2 <i>Perbandingan Hasil Penelitian Terdahulu</i>	46

4.3 Pengaruh Bilangan <i>Reynolds</i> pada Arus Listrik Konstan 100A	60
4.3.1 Distribusi Temperatur	60
4.3.2 Letak Temperatur Maksimum	65
4.3.3 $h_{average}$ pada Setiap Sel <i>Ultracapacitor</i>	71
4.3.4 Cd pada Setiap Sel <i>Ultracapacitor</i>	74
4.3.5 Koefisien <i>Losses</i> (K) pada Setiap <i>Ultracapacitor</i>	78
BAB 5 PENUTUP	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	87

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan kemampuan supercapacitor dengan baterai	6
Tabel 2.2 Konstanta pada persamaan 2.7 (Incropera et al, 2011).....	12
Tabel 2.3 konstanta pada persamaan 2.8 (Incropera et al, 2011).....	12
Tabel 2.4 Data yang digunakan dalam Simulasi	30
Tabel 3.1 <i>Boundary Condition</i>	39
Tabel 3.2 <i>materials properties</i>	40
Tabel 3.3 Variasi Kecepatan <i>Inlet</i>	41
Tabel 3.4 Variasi <i>heat flux</i>	42
Tabel 4.1 Hasil <i>Grid independency</i>	45
Tabel 4.2 Nilai RMS T_s pada Setiap Model Turbulensi.....	49
Tabel 4.3 Nilai RMS T_c pada Setiap Model Turbulensi	49
Tabel 4.4 Nilai RMS T_f pada Setiap Model Turbulensi.....	49
Tabel 4.5 Persen Selisih Rata-Rata Temperatur <i>average</i> terhadap Simulasi Terdahulu (Paradigma,2015)	62
Tabel 4.6 Persen Selisih Rata-Rata Nilai <i>h average</i> terhadap Simulasi Terdahulu (Paradigma,2015).....	73
Tabel 4.7 Persen Penyebab <i>Drag</i>	77
Tabel 4.8 Perbandingan T_{maks} dengan Variasi Arus Listrik dan Bilangan Re terhadap Simulasi Terdahulu	80

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan Densitas Daya pada Media Penyimpan Daya (Gidwani et al, 2014)	6
Gambar 2.2 Perpindahan Panas secara Konduksi 1 Dimesnsi (Incropera et al, 2011)	9
Gambar 2.3 Domain Penelitian (Paradigma,2015)	16
Gambar 2.4 Grafik Pengaruh Bilangan Re terhadap Nu (Paradigma, 2015)	17
Gambar 2.5 Grafik Pengaruh Nilai Re terhadap Temperatur (Paradigma, 2015)	17
Gambar 2.6 Grafik Pengaruh Nilai Re terhadap Koefisien <i>Drag</i> (Paradigma, 2015).....	18
Gambar 2.7 Nodal dan Tahanan <i>Thermal</i> pada Sel yang Berdekatan.....	19
Gambar 2.8 Dimensi dan Pengaturan pada Eksperimen (Lystianingrum et al, 2015).....	20
Gambar 2.9 Posisi Peletakan <i>Thermocouple</i> pada Setiap <i>Ultracapacitor</i>	21
Gambar 2.10 T_c , T_s dan T_f pada Setiap Sel	22
Gambar 2.11 Grafik Perbandingan antara Eksperimen dengan Permodelan (Gualous et al, 2009)	24
Gambar 2.12 Distribusi Temperatur sebagai Fungsi dari Radius <i>Ultracapacitor</i> untuk Waktu yang Berbeda (Gualous et al, 2009).....	25
Gambar 2.13 Posisi dari Ultracapacitor yang Diteliti	26
Gambar 2.14 Tegangan dan Arus Listrik terhadap Waktu saat Siklus berlangsung (Alaa Hijazi et al, 2012).....	27

Gambar 2.15 Posisi peletakan <i>thermocouple</i> pada <i>ultracapacitor</i> (Alaa Hijazi et al, 2012).....	28
Gambar 2.16 <i>Charge – Discharge</i> pada Siklus.....	28
Gambar 2.17 Hasil Eksperimen untuk $t_r = 90s$ dan kecepatan udara = 0,23m/s (Alaa Hijazi et al, 2012).....	29
Gambar 2.18 Skema Sistem Pendingin yang digunakan	30
Gambar 2.19 Distribusi Temperatur pada Kondisi Tunak..	30
Gambar 2.20 Kontur Kecepatan pada Susunan Supercapacitor Kondisi Tunak(Xia, 2014)	31
Gambar 3.1 Spesifikasi ukuran dalam millimeter (mm) <i>ultracapacitor</i> Maxwell BCAP0650.....	35
Gambar 3.2 Spesifikasi ukuran dalam millimeter (mm) <i>buss bar</i>	36
Gambar 3.3 Model domain fluida yang akan diteliti	36
Gambar 3.4 Ukuran domain simulasi pada <i>midspan</i>	37
Gambar 3.5 <i>Mesh</i> pada simulasi	37
Gambar 3.6 <i>Mesh</i> pada <i>Ultracapacitor</i>	38
Gambar 3.7 <i>Boundary Condition</i> pada Domain Simulasi...	39
Gambar 3.8 <i>Boundary Condition</i> pada BussBar	39
Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian	44
Gambar 4.1 Titik Pengambilan Data Temperatur dan Posisi dari <i>Ultracapacitor</i>	45
Gambar 4.2 Grafik <i>Grid independency</i>	46
Gambar 4.3 Titik Pengambilan Temperatur Pada penelitian	47
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu	48
Gambar 4.5 Grafik Temperatur Maksimum Arus Listrik 85A Re 10000	50

Gambar 4.6 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 85A Re 10000 (a) K- ϵ <i>Standard</i> (b) K- ϵ <i>Realizable</i> (c) K- ϵ <i>Standard Low</i> – Re (d) <i>Streamline</i> pada Susunan <i>Ultracapacitor</i>	53
Gambar 4.7 Nilai dari $h_{average}$ Arus Listrik 85A pada Re 10000	54
Gambar 4.8 Cd Arus Listrik 85A pada Re 10000	54
Gambar 4.9 Distribusi Temperatur Rata – Rata Arus Listrik 85A Re 10000.....	54
Gambar 4.10 Distribusi Temperatur terhadap Sudut pada <i>Midspan</i> pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi <i>Ultracapacitor</i> 1 dan 2	56
Gambar 4.11 Distribusi Temperatur terhadap Sudut pada <i>Midspan</i> pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi <i>Ultracapacitor</i> 6, 7 dan 8	57
Gambar 4.12 Distribusi Koefisien Perpindahan Panas terhadap Sudut pada <i>Midspan</i> pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi <i>Ultracapacitor</i> 1 dan 2	58
Gambar 4.13 Distribusi Koefisien Perpindahan Panas terhadap Sudut pada <i>Midspan</i> pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi <i>Ultracapacitor</i> 6,7 dan 8	59
Gambar 4.14 Pengaruh Bilangan <i>Reynolds</i> pada Arus Listrik 100 A Terhadap Temperatur Rata – Rata (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000	61
Gambar 4.15 <i>Streamline</i> pada Bilangan Re 6000 pada <i>Midspan</i>	64
Gambar 4.16 <i>Streamline</i> pada Bilangan Re 24000 pada <i>Midspan</i>	64

Gambar 4.17 Grafik Temperatur Maksimum pada Setiap Nilai Re Arus Listrik 100A (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000.....	65
Gambar 4.18 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re 6000 (a) <i>K-ϵ Standard</i> (b) <i>K-ϵ Realizable</i> (c) <i>K-ϵ Standard Low – Re</i>	68
Gambar 4.19 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re.....	69
Gambar 4.20 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re 24000 (a) <i>K-ϵ Standard</i> (b) <i>K-ϵ Realizable</i> (c) <i>K-ϵ Standard Low – Re</i>	71
Gambar 4.21 Grafik $h_{average}$ pada Arus Listrik 100A (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000.....	72
Gambar 4.22 Grafik Cd pada Arus Listrik 100A (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000.....	76
Gambar 4.23 Nilai K pada Arus Listrik 100A.....	78
Gambar 4.24 Perbandingan Daya Kipas Arus Listrik 100A pada Setiap Variasi Re	79
Gambar 4.25 Grafik Perbandingan T_{maks} terhadap Re	81

NOMENKLATUR

Simbol

D	<i>Ultracapacitor's diameter</i>
C_D	<i>Drag coefficient</i>
h	<i>Convection heat transfer coefficient</i>
C_P	<i>Specific heat capacity</i>
Re	<i>Reynolds number</i>

Simbol Yunani

μ	<i>Viscositas dinamik, Ns/m^2</i>
ρ	<i>Kerapatan udara, kg/m^3</i>

Singkatan

CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
TKE	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Ultracapacitor adalah sebuah komponen penyimpan energi elektrokimia yang reversibel. Penggunaan *ultracapacitor* sering dijumpai pada penyimpanan energi listrik dengan densitas energi yang tinggi. *Ultracapacitor*, yang juga dikenal *super capacitor*, memiliki potensial untuk memenuhi peningkatan *power* yang dibutuhkan untuk *energy storage*. Namun *specific energy* dari *ultracapacitor* masih lebih rendah daripada baterai (Gidwani et al, 2014).

Penggunaan *ultracapacitor* sendiri sudah diaplikasikan pada beberapa bidang, seperti otomotif, pembangkit listrik dengan tenaga angin, sistem pada dunia penerbangan dan industri. Pada dunia otomotif, *ultracapacitor* digunakan sebagai penyedia daya pada mobil listrik dan digunakan untuk proses start up pada mesin. Pada pembangkit listrik dengan tenaga angin, *ultracapacitor* berfungsi sebagai *power electronic conditioner* pada turbin angin untuk meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan dengan menyeimbangkan tegangan dan frekuensi yang diekstrak dari energi angin. *Ultracapacitor* pada dunia penerbangan digunakan sebagai penyimpan daya untuk sistem kontrol yang ada pada pesawat, selain itu juga digunakan sebagai penyimpan daya darurat untuk pintu evakuasi dan *evacuation slide*. Penggunaan pada dunia industri sebagai penyedia daya darurat.

Pada beberapa manufaktur *ultracapacitor*, seperti Maxwell, menyebutkan temperatur operasi dari *ultracapacitor* yang mereka produksi terbatas dari -40° hingga 65°C (Maxwell, 2015). Kenaikan temperatur yang berlebihan dapat menyebabkan beberapa konsekuensi berikut: Penurunan karakteristik *ultracapacitor*, terutama ESR, *discharge*, dan *lifetime*. Peningkatan tekanan di dalam *ultracapacitor*. Terjadi *premature aging* pada *metal contact/ terminal connection*. Penguapan

terhadap *electrolyte* yang berujung pada kerusakan *ultracapacitor* (Al Sakka et al, 2009).

Pada kendaraan hybrid, *ultracapacitor* digunakan sebagai komponen penyimpan energi, dimana kemungkinan *ultracapacitor* menyediakan peak power. *Ultracapacitor* digunakan pada saat arus listrik yang tinggi sehingga menimbulkan energi panas yang sangat tinggi yang dapat merusak *ultracapacitor*. Akibat dari adanya permasalahan tersebut perlu diadakan penelitian untuk mendesain sistem pendinginan serta investigasi mengenai distribusi dan temperatur maksimum yang terjadi pada *ultracapacitor* (Gualous, 2009).

Panas berlebih pada *ultracapacitor* dapat diatasi dengan bantuan sistem pendingin. *Forced convection* merupakan metode yang paling sederhana, murah, dan tidak banyak memakan tempat sehingga populer dipilih sebagai sistem pendingin. Paradigma (2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh besar nilai Re terhadap temperatur dan Nusselt number. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin besar nilai Re akan menyebabkan nilai temperatur maksimum bergeser menuju *ultracapacitor* yang berada di dekat inlet, selain itu nilai nusselt terendah yang didapatkan berubah bergantung pada nilai Re .

Lystianingrum (2015) melakukan permodelan pada *ultracapacitor* sebagai sarana untuk memprediksi *thermal behaviour* pada suatu elemen sehingga dapat digunakan untuk acuan dalam mendiagnosa dan memonitor temperatur yang dihasilkan. Permodelan dilakukan dengan menggunakan *thermal lumped model* serta dilakukan eksperimen untuk dilakukan validasi.

Selain mendesain sistem pendingin, perlu diadakan studi mengenai fenomena aliran saat sistem pendinginan dimatikan. Xia (2014) melakukan simulasi pada *ultracapacitor* dengan dua kondisi, yaitu saat pendingin dinyalakan sehingga terjadi *forced convection* dan saat dimatikan sehingga yang terjadi adalah *natural convection*. Dari penelitian tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap performa dari *ultracapacitor*.

Salah satu penyebab utama perlu diadakan penelitian ini adalah permasalahan yang muncul pada saat *ultracapacitor* digunakan, *ultracapacitor* dihubungkan dengan arus listrik yang besar dan juga mengeluarkan arus listrik yang besar juga. Akibat dari arus listrik yang besar ini muncul energi bengkitan berupa energi panas yang besar. Dari energi panas yang besar akan menimbulkan temperarur yang tinggi. Perlu adanya peneltitian mengenai analisis peningkatan temperatur hingga mencapai kondisi tunak untuk mengetahui daerah dengan temperatur kritikal sehingga dapat diketahui posisi peletakan sensor temperatur untuk pengawasan pada *ultracapacitor* yang lebih baik.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, temperatur dapat mempengaruhi peforma dari ultracapcitor bahkan merusak *ultracapacitor*. Perlu adanya penelitian mengenai bagaimana karakteristik aliran saat pada kondisi diam kemudian kipas dinyalakan untuk menurunkan temperatur *ultracapacitor* hingga mencapai kondisi tunak. Pada penelitian ini beberapa hal yang menjadi rumusan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi temperatur aliran dengan menggunakan sistem *forced air cooling*?
2. Bagaimana koefisien perpindahan panas konveksi yang didapatkan serta pengaruhnya terhadap *ultracapacitor*?
3. Pada daerah mana yang terjadi temperatur kritikal?
4. Bagaimana hasil simulasi yang didapatkan dengan menggunakan *software* Star CCM+ dibandingkan Fluent dan pengaruh dari *turbulence model* yang digunakan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fenomena aliran dan perpindahan panas yang terjadi pada susunan *ultracapacitor* pada kondisi *transient*. Penelitian berfokus pada pengaruh variasi kecepatan dan arus listrik terhadap temperatur dan koefisien

perpindahan panas konveksi. Berikut paparan tujuan dari penelitian ini:

1. Mengetahui kontur aliran dan distribusi temperatur pada *ultracapacitor*
2. Mengetahui besar koefisien perpindahan panas konveksi serta pengaruhnya terhadap *ultracapacitor*
3. Mengetahui daerah dengan temperatur kritikal
4. Melakukan validasi hasil penelitian terhadap penelitian sebelumnya
5. Membandingkan hasil simulasi *software* Star CCM+ pada beberapa *turbulence model* dengan Fluent

1.4 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian ini tidak menyimpang dari tujuan penelitian dan tidak mengembang terlalu luas, maka digunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Kondisi aliran *steady* dan *incompressible*
2. Faktor kekasaran pada permukaan diabaikan.
3. Perpindahan panas akibat radiasi diabaikan.
4. Ultracapacitor disusun secara seri, sehingga arus listrik yang bekerja konstan.
5. *Heat flux uniform* pada seluruh permukaan *ultracapacitor* dan bernilai konstan.
6. Pada *buss bar* tidak ada *heat generation* hanya panas hasil konduksi dengan *ultracapacitor*.
7. Efek penumpu *cell* diabaikan.
8. Bagian dalam dari *ultracapacitor* diabaikan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Ultracapacitor*

Kapasitor adalah komponen yang menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Medan ini terbentuk dari pemisahan muatan listrik. Salah satu pengembangan dari kapasitor adalah *supercapacitor* atau *ultracapacitor*. *Ultracapacitor* adalah sebuah komponen penyimpan energi elektrokimia yang reversibel. Penggunaan *ultracapacitor* sering dijumpai pada penyimpanan energi listrik dengan densitas energi yang tinggi. *Ultracapacitor* idealnya digunakan sebagai media penyimpanan energi dengan kondisi sering dilakukan pengisian pada arus listrik yang tinggi dan berdurasi pendek.

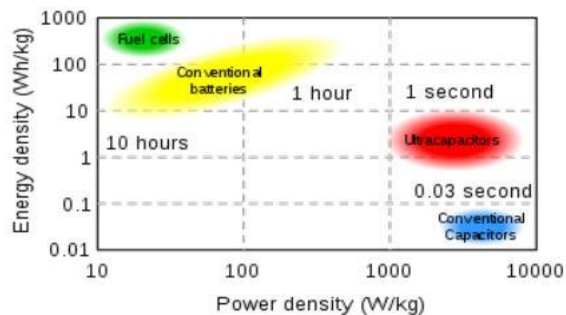
Terdapat 2 prinsip utama pada penyimpanan *ultracapacitor*:

- *Double - layer capacitance* – penyimpanan listrik statis didapatkan dengan pemisahan muatan listrik di dalam lapisan ganda Helmholtz pada pertemuan antara permukaan elektroda yang bersifat konduktif dan elektrolit. Pemisahan muatan terjadi pada beberapa angstrom (0.3 – 0.8 nm), dimana jarak ini jauh lebih kecil daripada kapasitor konvensional.
- *Pseudo capacitance* – penyimpanan elektrokimia *faradic* dengan cara *electron charge – transfer*, diperoleh dari reaksi *redox* atau pemasukan elektron.

Ultracapacitor memiliki potensi untuk menyimpan energi dalam jumlah yang besar. Jika dibandingkan dengan baterai, *ultracapacitor* memiliki *specific power* yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih tinggi dan *cycle life* yang lebih lama (Gidwani et al, 2014). Di bawah ini ditampilkan perbandingan antara kemampuan supercapacitor dengan baterai dengan beberapa parameter pada tabel 2.1. Selain itu juga pada gambar 2.1 ditunjukkan perbandingan densitas antara berbagai media penyimpan daya.

Tabel 2.1 Perbandingan kemampuan supercapacitor dengan baterai
(Gidwani et al, 2014)

Parameter	<i>Supercapacitor</i>	<i>Lithium – ion</i>
Waktu pengisian	1-10 s	10-60 min
Waktu siklus	1 juta or 30000h	500 dan lebih tinggi
Voltase sel	2.3 to 7.5 V	3.6 to 3.7 V
<i>Specific energy</i> (Wh/kg)	5	100-200
<i>Specific power</i> (Wh/kg)	Lebih dari 10000	1000 hingga 3000
Biaya per Wh	\$20	\$0.5-\$1.00
Waktu kerja(pada kendaraan)	10 hingga 15 tahun	5 hingga 10 tahun
Temperatur pengisian	-40 hingga 65°C	0 hingga 45°C
Temperatur keluaran	-40 hingga 65°C	-20 hingga 60°C



Gambar 2.1 Perbandingan Densitas Daya pada Media Penyimpan Daya (Gidwani et al, 2014)

Pada saat *ultracapacitor* tersambung dengan sumber tegangan, maka sejumlah arus listrik akan mengalir melewati hambatan dalam. Hambatan ini dinamakan *Equivalent Series Resistance* (ESR) sehingga mengakibatkan panas tertimbun di dalam *ultracapacitor* saat arus listrik masuk maupun keluar. Total daya yang dibuang dalam bentuk panas oleh *ultracapacitor* ditunjukkan oleh persamaan 2.1,

$$P_{terdisipasi} = ESR \times I^2 \quad (2.1)$$

dimana P adalah daya (Watt) dan I adalah arus listrik (Ampere) (Al Sakka et al, 2009).

Penggunaan *ultracapacitor* banyak dijumpai. Beberapa contoh aplikasi dari penggunaan *ultracapacitor* adalah sebagai berikut:

- Pada otomotif, untuk menyediakan *peak power* sebagai pemulihan energi pada mobil listrik atau *hybrid*
- Pada motor pembakaran dalam, digunakan untuk proses *start up*
- Pada turbin angin, sebagai *power electronic conditioner* untuk meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan
- Penggunaan pada dunia industri sebagai penyedia daya darurat (Frivaldsky, 2014).

2.2 Heat Transfer

Heat transfer adalah suatu kejadian berpindahnya energi panas karena perbedaan temperatur. Pada posisi dimana saja jika terjadi perbedaan temperatur pada antar medi, maka akan terjadi *heat transfer*.

2.2.1 Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan panas tanpa diikuti perpindahan dari substansi media itu sendiri. Perpindahan panas secara konduksi bisa terjadi pada gas, *liquid*, dan solid. Konduksi pada fluida terjadi jika perpindahan panas saat fluida memiliki nilai nol pada *bulk velocity*, sedangkan pada solid, konduksi adalah satu-satunya cara terjadinya perpindahan panas.

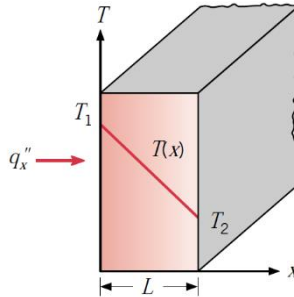
Pada fluida perpindahan panas terjadi ketika adanya perbedaan temperatur. Bagian temperatur yang tinggi memiliki tingkat energi kinetik atau kecepatan gerak acak molekul yang tinggi ini akan melakukan transfer energi dengan menabrak molekul disampingnya. Pada saat itu, terjadi perpindahan momentum dan energi yang arahnya menuju area fluida. Gerakan perpindahan momentum dan energi ini akan terus terjadi sampai terjadi kesetimbangan tingkat energi. Perbedaan pada *liquid* dan gas ialah perpindahan secara konduksi akan lebih kompleks. Ini dikarenakan ruang antar molekul yang lebih sempit. *Molecular force fields* akan mempengaruhi pertukaran energi dan gerakan acak molekul.

Konduksi bisa terjadi akibat gerakan bebas *electron* yang hanya pada konduktor listrik yang baik. Transportasi energi ini terjadi karena perpindahan *electron* yang mengalir karena terjadinya perbedaan potensial listrik. *Lattice waves* dikarenakan energi getaran molekul juga bisa menyebabkan perpindahan panas secara konduksi. Gerakan ini mirip dengan gerakan molekul gas. Mekanisme *lattice waves* akan sangat berpengaruh pada *nonmetal* dan berlaku sebaliknya pada *metal*. Momen yang disebabkan kutub-kutub magnet dan *electromagnetic radiation* juga akan menyebabkan perpindahan panas secara konduksi (Janna, 2000).

Proses perpindahan panas dapat dikuantitaskan dengan menggunakan persamaan *rate equation* yang sesuai. *Rate equation* ini digunakan untuk menghitung besarnya energi yang ditransfer per unit waktu. *Rate equation* untuk konduksi dikenal dengan

Fourier's law. Untuk *wall* satu dimensi seperti ditunjukkan gambar 2.2 dengan distribusi temperatur $T(x)$, *rate equation* ditulis sebagai persamaan 2.2.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Perpindahan Panas secara Konduksi 1 Dimesnsi
(Incropera et al, 2011)

Heat flux q_x'' (W/m^2) merupakan *rate* perpindahan panas ke arah x per unit area tegak lurus dengan perpindahan panas, dan propotional dengan temperatur *gradient* dT/dx . Parameter k adalah *thermal conductivity* ($\text{W}/\text{m.K}$) dan merupakan karakteristik dari material *wall*. Tanda minus terjadi karena perpindahan panas terjadi ke arah temperatur lebih rendah. Untuk kondisi *steady state*, distribusi temperatur linear dan persamaan 2.2 menjadi persamaan 2.3

$$q_x'' = k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.3)$$

Dimana *heat rate* konduksi q_x (W) melalui *wall* dengan area A adalah $q_x = q_x'' \cdot A$.

Secara general persamaan 2.2 dapat ditulis menjadi persamaan 2.4 (Incropera et al, 2011)

$$q'' = -k \nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

Pada suatu medium, ada kemungkinan terdapat sumber energi yang berkaitan dengan laju energi bangkitan (\dot{E}_g) dalam *control volume*. Ditambah ada kemungkinan terjadi perubahan jumlah energi dalam yang tersimpan (\dot{E}_{st}) di dalam *control volume*.

Berdasarkan hukum kekekalan energi, jumlah energi yang dikonduksikan ke sebuah *control volume* ditambah energi bangkitan dari *control volume* akan sama dengan energi yang dikonduksikan ke luar *control volume* ditambah energi yang masih tersimpan didalam *control volume*. Hal ini dapat dimodelkan dalam persamaan 2.5 berikut.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} &= +\dot{E}_{st} \\ (q_x + q_y + q_z) + (\dot{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz) - (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) &= \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} &= \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 merupakan bentuk umum dari *heat diffusion equation* pada koordinat Cartesian. Berdasarkan persamaan di atas dapat dibuat sebuah matriks distribusi temperatur. Matriks temperatur tersebut akan diselesaikan salah satunya dengan metode numeric. Selanjutnya dari hasil distribusi temperatur akan dapat dihitung perpindahan panas yang akan terjadi (Janna, 2000).

2.2.2 Konveksi

Konveksi ialah perpindahan panas yang terjadi karena *bulk movement* pada fluida. Perpindahan panas secara konveksi dibagi dua berdasarkan penyebab perpindahan fluida, yaitu *natural convection* dan *forced convection*. Perpindahan fluida pada *natural convection* terjadi karena perbedaan massa jenis. Pada *forced convection*, perpindahan fluida terjadi karena adanya gaya eksternal, contohnya dari kipas. Perpindahan panas secara *forced convection* akan lebih efektif dari pada *natural convection* (Janna, 2000).

Persamaan laju perpindahan panas yang sesuai untuk perpindahan panas secara konveksi adalah

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

Dimana q'' , konveksi *heat flux* (W/m^2) sebanding terhadap perbedaan temperatur antara permukaan (T_s) dengan fluida (T_∞). Persamaan 2.6 Dikenal dengan persamaan *Newton's law of cooling*. Parameter h ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) adalah *convection heat transfer coefficient*. Nilai h bergantung terhadap kondisi di *boundary layer* yang dipengaruhi permukaan geometri, massa jenis fluida (ρ), kecepatan fluida (U), viskositas fluida (μ), *specific heat* (cp), perbedaan temperatur (ΔT), dan *thermal conductivity* (k) (Incropera et al, 20011).

Pada kondisi *forced convection*, untuk aliran *cross flow* melewati *banks of tubes* digunakan pendekatan Zhukauskas yang ditunjukkan pada persamaan 2.7 dengan tabel konstanta pada tabel 2.2.

$$\overline{Nu_D} = C_1 Re_{D,max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

$$\left[\begin{array}{c} N_L \geq 20 \\ 0.7 \leq Pr \leq 500 \\ 10 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^6 \end{array} \right]$$

Keterangan:

$\overline{Nu_D}$ = bilangan *Nusselt* rata – rata
 Pr = bilangan Prandtl (pada $T_i = T_\infty$)
 Pr_s = bilangan *Nusselt* (pada $T_{avg} = (T_i + T_o)/2$)
 N_L = jumlah *tube rows*

Tabel 2.2 Konstanta pada persamaan 2.7 (Incropera et al, 2011)

Configuratio	$Re_{D,max}$	C_1	m
Aligned	$10-10^2$	0.80	0.40
Staggered	$10-10^2$	0.90	0.40
Aligned	10^2-10^3	Approximate as a single (isolated) cylinder	
Staggered	10^2-10^3		
Aligned ($S_T/S_L > 0.7$) ^a	$10^3-2 \times 10^5$	0.27	0.63
Staggered ($S_T/S_L < 2$)	$10^3-2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
Staggered ($S_T/S_L > 2$)	$10^3-2 \times 10^5$	0.40	0.60
Aligned	$2 \times 10^5-2 \times 10^6$	0.021	0.84
Staggered	$2 \times 10^5-2 \times 10^6$	0.022	0.84

^aFor $S_T/S_L < 0.7$, heat transfer is inefficient and aligned tubes should not be used.

Untuk susunan tabung dengan $N_L < 20$, diperlukan faktor koreksi sehingga persamaannya menjadi persamaan 2.8 dengan konstanta pada tabel 2.3.

$$\overline{Nu}_D|_{N_L < 20} = C_2 \cdot \overline{Nu}_D|_{N_L \geq 20} \quad (2.8)$$

Tabel 2.3 konstanta pada persamaan 2.8 (Incropera et al, 2011)

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Aligned	0.70	0.80	0.86	0.90	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
Staggered	0.64	0.76	0.84	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Untuk bilangan *Reynolds* $Re_{D,max}$ dihitung pada kecepatan fluida maksimum saat melewati *tube bank* dengan susunan *aligned* maka untuk mencari V_{max} , dapat digunakan persamaan 2.9 dan 2.10.

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} \quad (2.9)$$

Untuk mencari nilai bilangan *Reynolds*:

$$Re_{D,max} = \frac{\rho v_{max} D}{\mu} \quad (2.10)$$

2.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) ialah sebuah sistem analisa aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena reaksi kimia dengan cara simulasi yang dibantu komputer. Biaya pengembangan CFD tidak kecil, tetapi dapat menjadi sangat murah jika dibandingkan dengan fasilitas eksperimen yang bagus. Kelebihan CFD lainnya ialah kemampuan mempelajari sebuah sistem yang rumit dan dapat menghindari efek kecelakaan seperti pada saat eksperimen.

Salah satu software yang digunakan untuk melakukan permodelan dan perhitungan dengan metode CFD adalah Star – CCM +. Star – CCM+ dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada aliran fluida, perpindahan panas, dan tegangan. Selain itu dalam satu software sudah tersedia aplikasi untuk membuat geometry dan mesh serta untuk melakukan simulasi pada fluida ataupun benda padat, juga dilengkapi dengan turbulence model.

Turbulence model merupakan metode komputasi yang mendekati sistem perhitungan dengan *mean flow*. Model ini tidak dapat digunakan menunjukkan detail fluktuasi dari aliran turbulen. *Turbulence model* dapat melakukan perhitungan tanpa melakukan perhitungan medan aliran yang time dependent terlebih dahulu. Turbulence model yang terdapat pada Star – CCM + adalah sebagai berikut:

1. Spalart – Allmaras, model yang menyelesaikan persamaan transport tunggal yang mencari nilai dari turbulent viscosity. Keunggulan dari model ini adalah ekonomis (menyelesaikan 1 persamaan) dan cukup baik digunakan pada aliran yang cukup rumit, sedangkan kelemahan dari model ini adalah belum diuji secara luas dan kurangnya sub – model seperti pembakaran dan *buoyancy*.
2. K - ϵ , model yang menyelesaikan 2 persamaan yaitu persamaan untuk energi kinetik turbulen k dan laju disipasi. Secara umum terdapat 2 jenis sub - model K- ϵ ,

yaitu standard dan realizable. Perbedaan dari keduanya adalah pada realizable terdapat koefisien C_μ yaitu koefisien dari fungsi rata – rata aliran dan properti dari turbulensi, sedangkan pada standard nilai koefisien ini dianggap konstan. Kelebihan dari model ini adalah baik untuk perilaku aliran yang rumit seperti *jet impingement*, aliran terseparasi, swirl, dan aliran sekunder.

3. $K - \omega$, model ini memiliki model yang hampir serupa $K - \epsilon$. Model ini menyelesaikan energi kinetik turbulen k dan ω yang didefinisikan sebagai laju disipasi per unit k . $K - \omega$ memiliki keuntungan dibandingkan $K - \epsilon$ pada bilangan reynold rendah dan aliran transisi. $K - \omega$ memiliki 2 jenis sub-model, yaitu standard dan SST. Perbedaan dari keduanya adalah pada SST terdapat perhitungan dari hasil perkalian dot $\nabla k \cdot \nabla \omega$
4. Reynold Stress Turbulence, merupakan model yang paling rumit dimana model ini turut memperhitungkan efek aliran seperti anisotropy akibat dari swirl, kelengkungan streamline, perubahan laju regangan yang cepat dan aliran sekunder. Jumlah perhitungan yang diselesaikan oleh model ini sebanyak 7 persamaan sehingga membutuhkan kerja komputer yang lebih besar dan lebih baik.

2.4 Model $K-\epsilon$

Model turbulensi ini menyelesaikan 2 *transport equation*, yaitu *turbulence kinetic energy* (k) dan *dissipation rate* (ϵ). Pada model ini digunakan k dan ϵ untuk mendefinisikan *velocity scale* (θ) dan *length scale* ℓ . Secara perhitungan adalah sebagai berikut:
 Laju perubahan k atau ϵ + Transpor dari k atau ϵ = Transpor k atau ϵ dengan difusi + Laju pembuatan k atau ϵ – Laju penghancuran nilai k atau ϵ

Sehingga variable yang didapatkan adalah C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ dan $C_{2\epsilon}$. Ini adalah variabel yang didapatkan pada $K - \epsilon$ *Standard* dimana nilai dari C_μ dianggap konstan. $K - \epsilon$ *Standard* kurang baik digunakan pada simulasi yang terjadi pressure gradient yang besar.

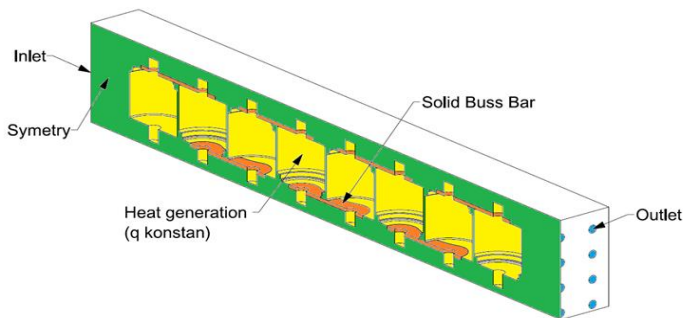
Pada $K-\epsilon$ *Realizable* nilai dari C_μ tidaklah konstan, melainkan sebagai fungsi rata – rata aliran dan properti dari turbulensi. Selain itu $K-\epsilon$ *Realizable* mampu memprediksi pusaran, resirkulasi separasi dan boundary layer pada *adverse pressure gradient* yang kuat. Selain dari kedua model di atas, model $K-\epsilon$ telah dikembangkan menjadi beberapa model seperti $K-\epsilon$ *Standard Low-Re*, $K-\epsilon$ Abe-Kondoh-Nagano (AKN) *Low-Reynolds Number*, $K-\epsilon$ V2F *Low-Reynolds Number* dan $K-\epsilon$ *Elliptic Blending*. $K-\epsilon$ *Standard Low-Re* memiliki fungsi yang sama dengan $K-\epsilon$ *Standard*, namun ditambahkan *damping function* untuk memperbaiki dalam memprediksi nilai dari k dan ϵ pada daerah dekat *wall* serta *viscous sub – layer* terjadi pada *wall*. Model ini direkomendasikan untuk aliran fluida dengan nilai bilangan Re rendah serta pada fenomena *free convection*. Model $K-\epsilon$ AKN *Low-Reynolds Number* menggunakan *damping function* yang berbeda dengan $K-\epsilon$ *Standard Low-Re*. Model ini cocok digunakan untuk aliran turbulen yang kompleks, seperti pada *compact heat exchanger*. Model ini menggunakan kolgomorov velocity scale (u_ϵ) sebagai pengganti friction velocity (u_τ) untuk menjelaskan fenomena *attach* dan *detach* aliran pada daerah dekat dinding. Pada $K-\epsilon$ V2F *Low-Reynolds Number* menyelesaikan 2 persamaan lagi, yaitu normal *stress function* dan *elliptic function* sehingga totalnya adalah 4 persamaan. Model ini akurat dalam menangkap efek turbulensi dekat *wall*, yang mana krusial untuk memprediksi perpindahan panas, *skin friction* dan separasi aliran. Model ini dibuat untuk menyelesaikan permasalahan pada *turbulent boundary layer*. Pada awalnya konsep dari *elliptic relaxation* dibuat untuk *Reynolds – Stress Model*. *Elliptic relaxation* digunakan untuk pengembangan 2 persamaan *eddy-viscosity*. Dengan adanya modifikasi pada model $K-\epsilon$, maka model ini dapat digunakan untuk bentuk geometri yang kompleks. Keuntungan dari model turbulensi ini adalah peningkatan akurasi pada daerah dekat *wall* dan peningkatan kestabilan dibandingkan $K-\omega$ SST.

2.5 Penelitian Terdahulu

Dalam beberapa tahun, telah dilakukan penelitian mengenai *thermal analysis* pada *ultracapacitor* dengan metode eksperimen atau dengan metode simulasi dengan CFD. Berikut beberapa penelitian yang menjadi referensi dari penulisan ini.

2.5.1 Studi numerik analisis karakteristik aliran dan perpindahan panas pada susunan *ultracapacitor* dengan *forced air cooling*

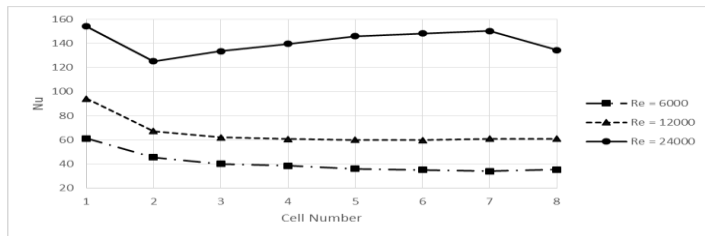
Paradigma (2015) melakukan penelitian pada *ultracapacitor* dengan susunan seri untuk mengetahui pengaruh dari pengaruh dari variasi arus listrik dan *Reynolds number* terhadap distribusi dari kecepatan, tekanan, temperatur, *Nusselt number*, dan koefisien *drag* pada setiap *cell*. Penelitian ini menggunakan *software* fluent dengan model turbulensi K- ϵ RNG. Domain simulasi dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Domain Penelitian (Paradigma,2015)

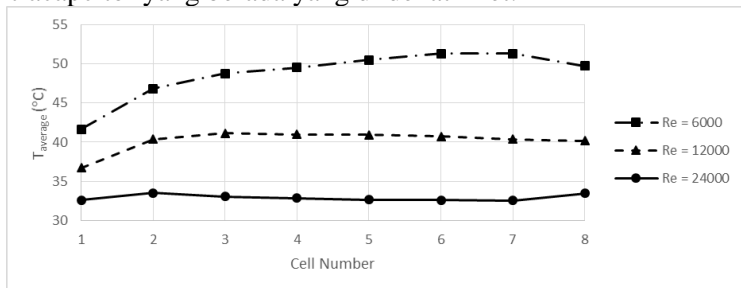
Dari hasil simulasi diketahui bahwa nilai temperatur maksimum menurun seiring bertambahnya nilai bilangan Re pada saat *heat flux constant*. Hal ini disebabkan semakin besar nilai Re maka nilai koefisien konveksi akan semakin besar pula, sehingga perpindahan panas dari *ultracapacitor* ke fluida akan meningkat.

Pada penelitian ini juga diketahui pengaruh nilai Re terhadap temperatur, *Nusselt number* dan koefisien drag tiap *cell*. Pada nilai Nu yang naik – turun disebabkan oleh karakteristik aliran yang melewati *cell*. Pada Re 6000, nilai Nu terendah berada pada *cell* 7, Re 12000 pada *cell* 6, nilai Re 24000 berada pada *cell* 2. Grafik pengaruh nilai Re terhadap temperatur ditunjukkan pada gambar 2.4.



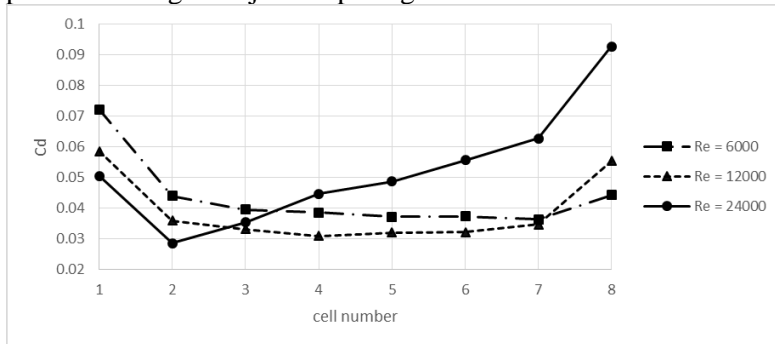
Gambar 2.4 Grafik Pengaruh Bilangan Re terhadap Nu
(Paradigma, 2015)

Pada analisa temperatur, temperatur pada grafik merupakan hasil perhitungan dari temperature rata – rata pada seluruh permukaan *ultracapacitor*. Dari hasil penelitian yang ditunjukkan pada gambar 2.5 ditarik kesimpulan semakin besar nilai Re maka letak nilai temperatur tertinggi akan bergeser menuju *ultracapacitor* yang berada yang di dekat inlet.



Gambar 2.5 Grafik Pengaruh Nilai Re terhadap Temperatur
(Paradigma, 2015)

Gaya drag adalah gaya yang dialami oleh bodi yang dilingkupi aliran dengan arah searah aliran. Pada $Re > 1000$, 95% gaya *drag* disebabkan ketidaksimetrisan distribusi tekanan sebelum dan sesudah melewati bodi. Hasil pada penelitian untuk parameter drag ditunjukkan pada gambar 2.6

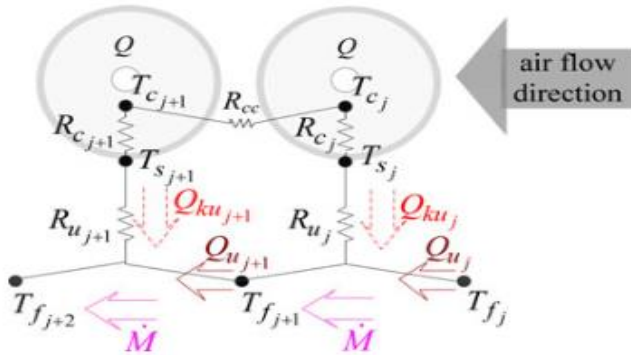


Gambar 2.6 Grafik Pengaruh Nilai Re terhadap Koefisien *Drag* (Paradigma, 2015)

2.5.2 On Estimating Instantaneous Temperature of a Supercapacitor String Using an Observer Based on Experimentally Validated Lumped Thermal Model

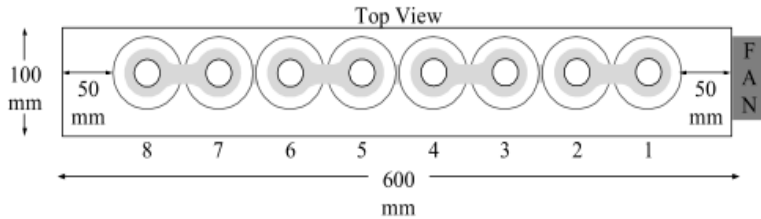
Lystianingrum et al (2015) melakukan studi eksperimen dan permodelan pada media penyimpanan energi, *ultracapacitor*. Pada penelitian ini, permodelan *thermal* yang digunakan adalah *Lumped Thermal Model*. Pada permodelan *Lumped Thermal Model*, benda uji dimodelkan sebagai elemen yang terdapat nodal – nodal dengan properti *thermal* yang seragam dan diselesaikan dengan menggunakan metode matriks. Pada sel *ultracapacitor* yang tunggal, nodal terletak pada terminal (perwujudan dari temperatur internal) dan temperatur pada permukaan yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Perpindahan panas konduksi terjadi dari temperatur inti (T_c) menuju temperatur permukaan (T_s) dengan tahanan *thermal* (R_c) dan terjadi perpindahan panas secara konveksi dari temperatur permukaan (T_s) dengan temperatur

lingkungan (T_f) dengan tahanan *thermal* konveksi (R_u). Energi panas (Q) dibangkitkan dari sel.



Gambar 2.7 Nodal dan Tahanan *Thermal* pada Sel yang Berdekatan
(Lystianingrum et al, 2015)

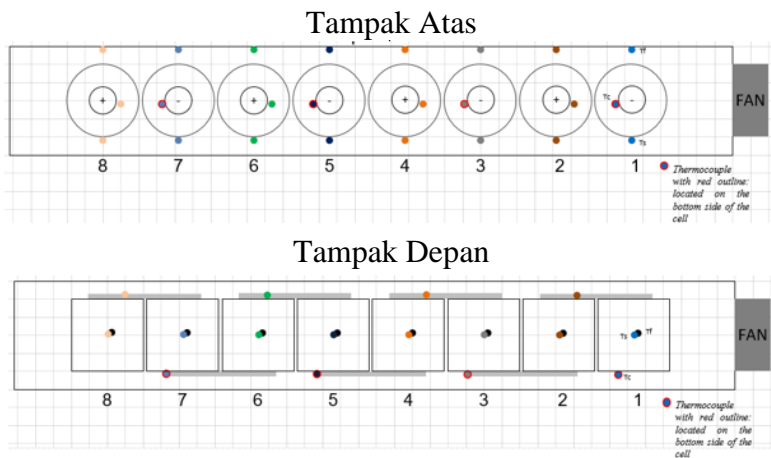
Pada gambar 2.8 menunjukkan letak sel pada eksperimen ini adalah *ultracapacitor* 650 F Maxwell sebanyak 8 buah yang disusun dan dihubungkan secara seri. Diameter sel 60.7 mm dan tinggi 51.5 mm. Tiga thermocouple diletakkan untuk mengukur T_c , T_s dan T_f . Nilai dari T_c didapatkan dari pengukuran pada temperature terminal, dengan asumsi tahanan *thermal* arah axial memiliki nilai yang rendah. String *ultracapacitor* berada dalam keadaan tertutup dan kipas dipasang pada salah satu sisi. Sistem pengujian yang digunakan adalah Arbin BT-ML yang dikendalikan oleh komputer. Dari hasil eksperimen akan dilakukan perbandingan dengan hasil dari eksperimen.



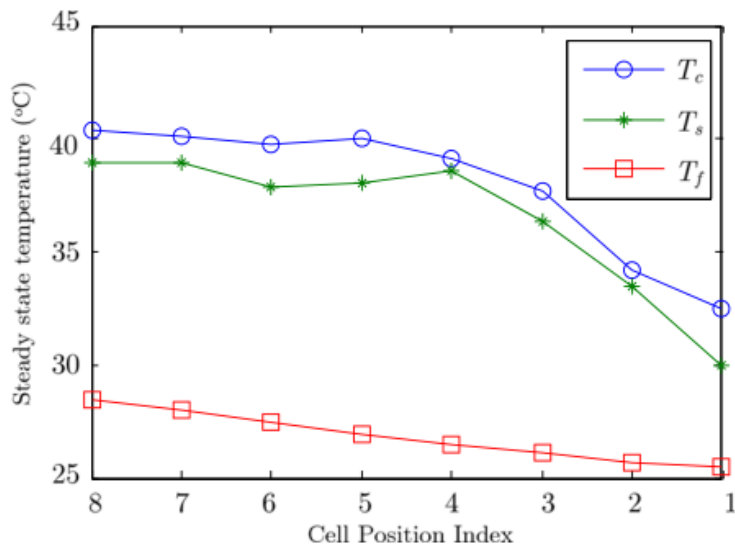
Gambar 2.8 Dimensi dan Pengaturan pada Eksperimen
(Lystianingrum et al, 2015)

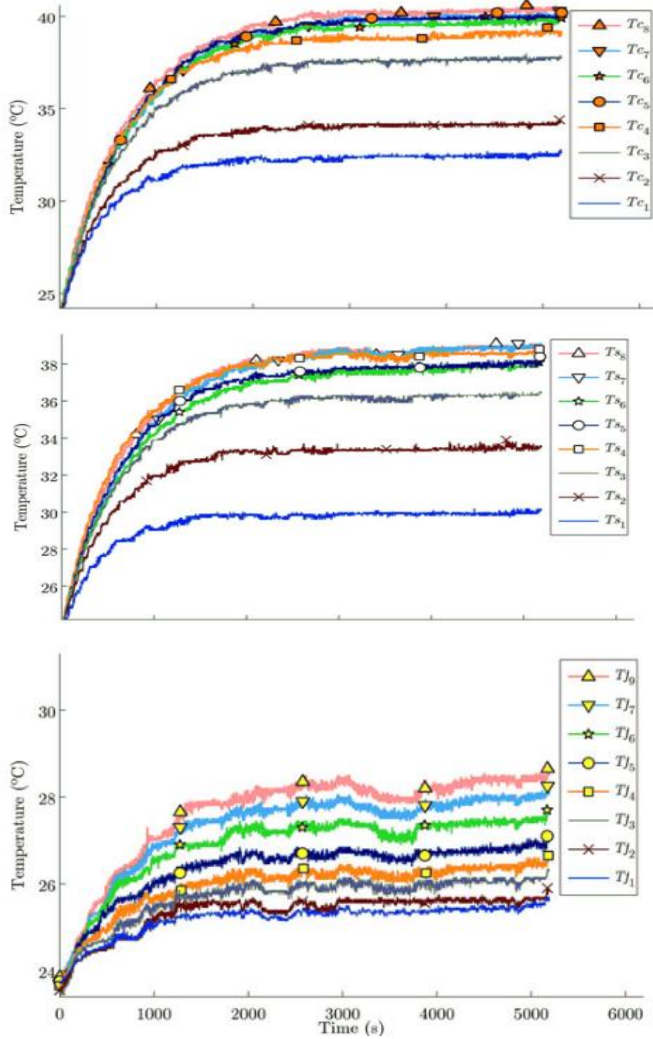
Tahanan *thermal* konveksi bergantung pada koefisien perpindahan panas yang bergantung pada karakteristik aliran lokal, sehingga bergantung pada posisi *ultracapacitor* sel. Parameter yang berhubungan langsung dengan nilai R_u adalah kecepatan udara dan koefisien konveksi, sehingga mempengaruhi temperatur. Di sisi lain, variasi dari R_c tidaklah sebesar R_u , karena nilai dari R_c bergantung dari material.

Temperatur permukaan mengalami kenaikan kemudian menjadi relatif konstan seperti yang terlihat pada gambar 2.10. Pada gambar 2.9 menunjukkan hasil eksperimen pada kondisi tunak dan pada gambar 2.10 ditunjukkan grafik perubahan temperatur terhadap waktu selama 3000 detik. Penyebab terjadi pola yang demikian adalah koefisien perpindahan panas yang mendefinisikan R_u bergantung pada karakteristik aliran seperti kecepatan, turbulensi dan pola aliran. Semakin besar nilai sel, maka *turbulent kinetic energy* perlahan – lahan mencapai kondisi tunak. Temperatur yang diukur adalah temperatur sel (T_c), temperatur permukaan (T_s) dan temperatur lingkungan (T_f). Kesimpulan dari hasil eksperimen ini adalah model lumped capacitance dapat digunakan sebagai permodelan untuk *forced air cooling* untuk *ultracapacitor*. Aliran udara memiliki peranan penting dalam perubahan dari parameter seperti hambatan thermal dan kapasitas thermal konveksi. Metode RMSE (*Root Mean Squared Error*) yang digunakan dalam mengestimasi temperature memiliki keakuratan yang cukup baik.



Gambar 2.9 Posisi Peletakan *Thermocouple* pada Setiap *Ultracapacitor*



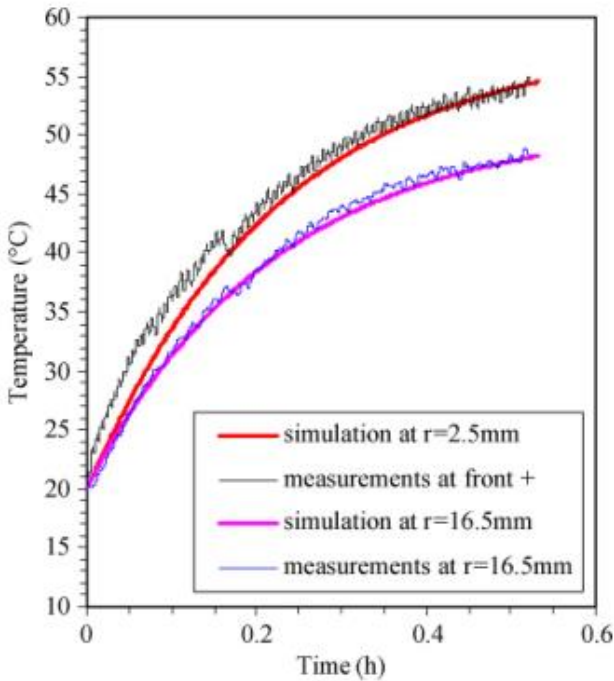


Gambar 2.10 T_c , T_s dan T_f pada Setiap Sel
(Lystianingrum et al, 2015)

2.5.3 Supercapacitor Thermal Modelling and Characterization in Transient State for Industrial Application

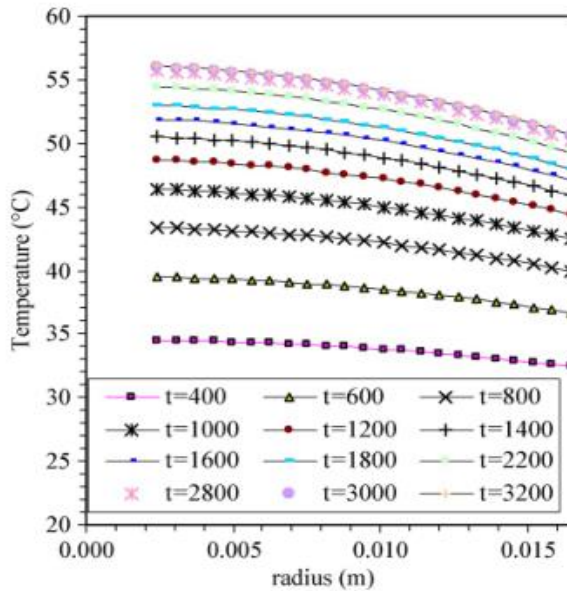
Gualous et al (2009) melakukan eksperimen dengan menggunakan *ultracapacitor* BCAP0350 yang disambung dengan *charger* untuk arus satu arah dari *power switch* MOFSET dan dioda *fast – recovery rectifier* yang digunakan sebagai dioda *free – wheel* saat MOFSET dimatikan. Arus listrik dialirkan secara konstan dengan menggunakan mikrokontroler. Temperatur pada permukaan *ultracapacitor* diukur dengan menggunakan termokopel tipe K diletakkan pada arah aksial dan radial. Eksperimen ini akan dibandingkan dengan permodelan yang telah dilakukan dengan menggunakan *thermal lumped model* dengan *finite – difference* yang membentuk matriks *tridiagonal* yang diselesaikan dengan algoritma Thomas

Ultracapacitor yang diuji memiliki diameter terluar sebesar 33 mm dan panjang 61,5 mm. Daya yang terdisipasi diasumsikan seragam, yaitu sebesar 2.88 W untuk masukan atau keluaran arus 30 A. Untuk eksperimen ini temperature lingkungan adalah 20°C dan *ultracapacitor* didinginkan dengan aliran udara yang berkecepatan rendah. Untuk koefisien perpindahan panas adalah 12 W/m²K dengan konduktivitas *thermal* arah radial 0.5 W/mK dan pada arah aksial 210 W/mK dengan tahanan *thermal* yang didapatkan dari hasil perhitungan sebesar 10,66 K/W. Pengukuran dilakukan pada radius dalam dengan $r = 2,5$ mm dan radius terluar 16,5 mm. Pada hasil eksperimen terdapat sedikit perbedaan dengan hasil yang diperkirakan pada $r = 2,5$ mm. Hal ini disebabkan oleh pengukuran temperatur pada kutub positif *ultracapacitor* diasumsikan sama dengan temperature di dalam *ultracapacitor* pada $r = 2.5$ mm. Hasil dari penelitian ini ditunjukkan dalam bentuk grafik pada gambar 2.11 dan 2.12.



Gambar 2.11 Grafik Perbandingan antara Eksperimen dengan Permodelan (Gualous et al, 2009)

Selain itu, pada kondisi yang sama juga didapatkan evolusi waktu dari profil temperatur sepanjang arah radial. Dari hasil yang didapat ditunjukkan bahwa temperatur arah radial menurun sepanjang radius akibat adanya disipasi *convective heat flux* pada sisi luar *ultracapacitor*. Perbedaan temperatur pada sisi dalam dan permukaan *ultracapacitor* terus bertambah sepanjang waktu. Penambahan perbedaan ini terjadi karena *ultracapacitor* mengakumulasi panas pada saat pengisian dan pengeluaran. Distribusi temperatur yang terjadi dikarenakan tahanan thermal arah radial lebih tinggi daripada arah aksial.

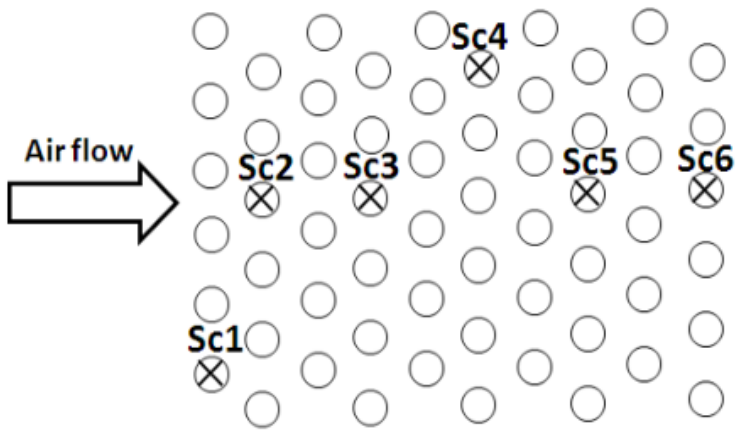


Gambar 2.12 Distribusi Temperatur sebagai Fungsi dari Radius *Ultracapacitor* untuk Waktu yang Berbeda (Gualous et al, 2009)

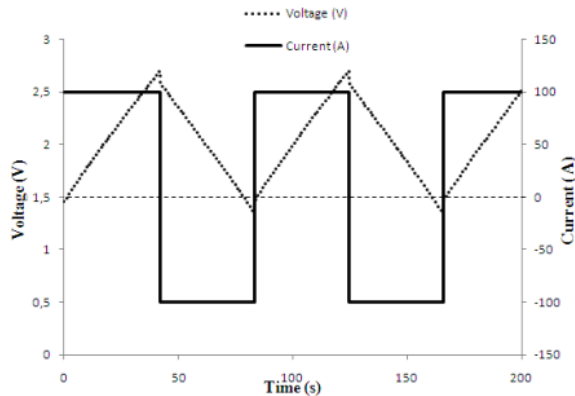
2.5.4 Thermal Network Model of Supercapacitor

Alaa Hijazi et al (2012) melakukan permodelan pada susunan *ultracapacitor* Maxwell BCAP 3000F 2,7 V dihubungkan secara seri. *Ultracapacitor* didistribusikan pada kedua sisi susunan dan setiap sisi tersusun 10 kolom yang terdiri dari 6 *ultracapacitor* yang disusun secara *staggered*. Permodelan *thermal* yang digunakan didasarkan pada pendekatan *lumped parameter* dan diskritisasi pada *finite volume*. Untuk posisi dari *ultracapacitor* yang diteliti dtunjukkan pada gambar 2.13. Untuk menyederhanakan permodelan *thermal*, sumber panas reversibel di dalam *ultracapacitor* diabaikan. Di dalam *ultracapacitor* fenomena konduksi terjadi dengan nilai dari tahanan *thermal*

konduksi turut diperhitungkan serta fenomena *free convention* antara kapasitor dengan udara sekitar terjadi dengan terdapat parameter tahanan *thermal* konveksi. Pada eksperimen dilakukan siklus *charge* – *discharge* diikuti dengan adanya periode untuk kapasitor berhenti. *Ultracapacitor* di – *charge* dan *discharge* pada nilai arus listrik yang konstan untuk mendapatkan nilai energi bangkitan yang konstan yang ditunjukkan pada gambar 2.14 dan gambar 2.16

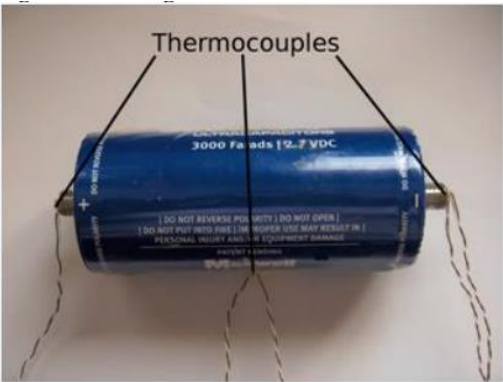


Gambar 2.13 Posisi dari Ultracapacitor yang Diteliti
(Alaa Hijazi et al, 2012)

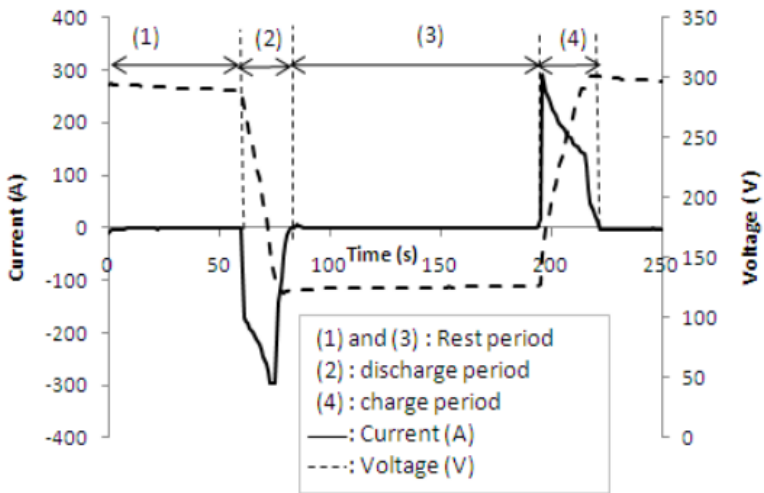


Gambar 2.14 Tegangan dan Arus Listrik terhadap Waktu saat Siklus berlangsung (Alaa Hijazi et al, 2012)

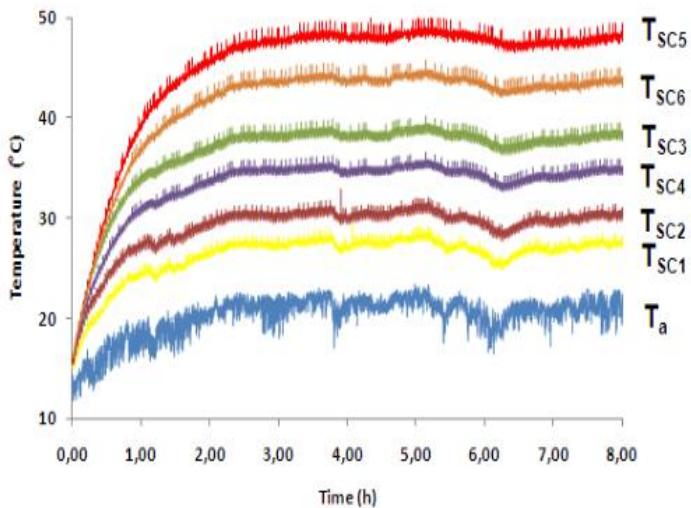
Pemrosesan data dilakukan pada *software* Labview dengan pengujian dilakukan pada nilai daya yang konstan sebesar 50 kW dan perhitungan temperatur hingga kondisi *steady* dilakukan dengan menggunakan *software* mathworks. Pengambilan data pada simulasi menyesuaikan posisi permukaan ultracapacitor saat melakukan eksperimen. Posisi peletakan thermocouple pada melakukan eksperimen ditunjukkan pada gambar 2.15. Pengujian dilakukan sebanyak 6 kali dengan melakukan variasi pada rest period (t_r) dan kecepatan udara. Kecepatan aliran udara diatur dengan memvariasikan tegangan listrik pada ventilator dan kecepatan udara diukur dengan anemometer. Hasil dari eksperimen yang dilakukan ditunjukkan pada gambar 2.17



Gambar 2.15 Posisi peletakan *thermocouple* pada *ultracapacitor* (Alaa Hijazi et al, 2012)



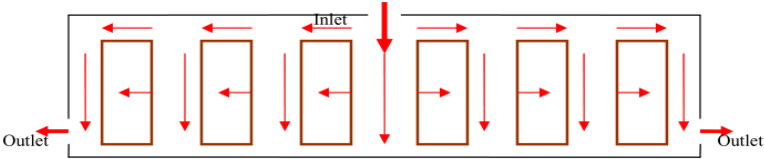
Gambar 2.16 *Charge – Discharge* pada Siklus (Alaa Hijazi et al, 2012)



Gambar 2.17 Hasil Eksperimen untuk $t_r = 90$ s dan kecepatan udara = $0,23\text{m/s}$ (Alaa Hijazi et al, 2012)

2.5.5 Study on the Cooling System of super-capacitors for Hybrid Electric Vehicle

Xia (2014) melakukan simulasi numerik untuk pendinginan susunan *supercapacitor* pada mobil listrik menggunakan Star CCM+. Pada penelitian ini anoda dan katoda dari *supercapacitor* didasarkan pada LiMn_2O_4 dan karbon aktif serta ditambahkan *lithium - ion* pada elektrolit. Permodelan pada simulasi didasarkan pada saat supercapacitor mengalami *charging* pada tegangan 60 V atau 5C (kapasitas *supercapacitor* penuh), kemudian dilakukan discharge menjadi tegangan listrik 42 V dengan rasio 3C, dan siklus diulangi sebanyak 3 kali. Bentuk dari supercapacitor adalah kotak berjumlah 6 buah yang disusun secara seri sesuai yang ditunjukkan pada gambar 2.18 beserta sistem pendingin yang digunakan. Tabel 2.4 menunjukkan data – data yang digunakan pada simulasi ini.

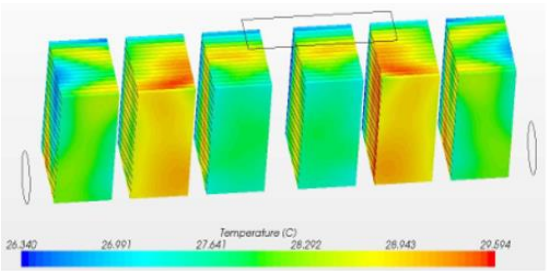


Gambar 2.18 Skema Sistem Pendingin yang digunakan

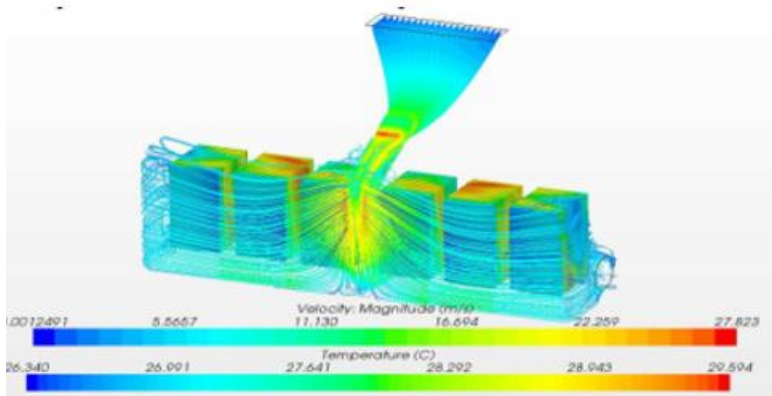
Tabel 2.4 Data yang digunakan dalam Simulasi
(Xia, 2014)

Parameter	Specific heat (J/(kg.k))	Thermal conductivity (W/m.°C)	density (g/cm ³)	Fan flow (m ³ /min)	Initial temperature (°C)
Value	1537	15.1	2.8	3	25

Hasil yang didapatkan adalah sistem pendinginan yang digunakan baik dalam menjaga temperatur kerja dari susunan supercapacitor. Dari sistem pendingin yang digunakan dapat mengurangi temperatur pada bagian dalam dari supercapacitor. Simulasi dijalankan hingga kondisi mencapai kondisi tunak dengan hasil distribusi temperatur yang telah stabil seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19. Temperatur tertinggi yang didapatkan sebesar 29.6°C, sedangkan temperature terendah sebesar 26.3°C. Selain itu pada gambar 2.20 ditunjukkan juga kontur kecepatan yang terjadi pada susunan supercapacitor pada kondisi tunak.



Gambar 2.19 Distribusi Temperatur pada Kondisi Tunak
(Xia, 2014)



Gambar 2.20 Kontur Kecepatan pada Susunan Supercapacitor
Kondisi Tunak(Xia, 2014)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian *Computational Fluid Dynamics* ini menggunakan *software* Star CCM. Untuk benda uji yang digunakan adalah *ultracapacitor* Maxwell tipe BCAP0650 P270 K04 yang disusun seri sebanyak 8 buah dengan fluida udara pada temperatur 300 K yang memiliki massa jenis fluida (ρ) = 1,1614 kg/m³, viskositas (μ) = 1,855 x 10⁻⁵ Pa.s, dan *specific heat capacity* (C_p) = 1007 J/kg.K sebagai media pendingin.

Pada metode yang digunakan akan terbagi menjadi 3 tahap pengerjaan, yaitu tahap *pre-processing*, *processing* dan *post – processing*.

3.1 Pre – Processing

3.1.1 Modelling

Pada penelitian ini pembuatan model dari *ultracapacitor* menggunakan *software* Autodesk Inventor. Penelitian ini mengambil referensi dari eksperimen yang pernah dilakukan. Domain yang dimodelkan adalah *ultracapacitor*, buss bar dan domain fluida.

a. Ultracapacitor

Ultracapacitor yang digunakan adalah *ultracapacitor* Maxwell tipe BCAP0650. Pada gambar 3.1 ditunjukkan spesifikasi ukuran dari *ultracapacitor*. Berikut data sheet dari BCAP0650 (Maxwell Tech, 2014).

<i>Rate Capacitance</i>	: 650 F
<i>ESR_{DC}</i>	: 0,8 mΩ
<i>Absolute Max voltage</i>	: 2,85 V
<i>Absolute Max Current</i>	: 680 A
<i>Min Operating Temp</i>	: -40°C
<i>Max Operating Temp</i>	: 65°C

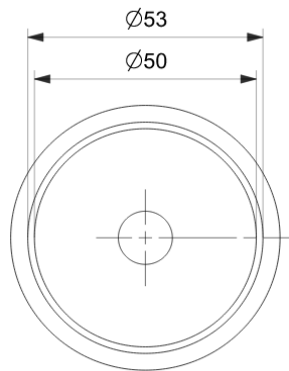
b. *Buss Bar*

Buss bar yang digunakan adalah tipe Maxwell BKIT-MCHIT part no. 107414 dengan material penyusun 6061 aluminium. Pada gambar 3.2 berikut ditunjukkan spesifikasi ukuran dari *buss bar* (Maxwell tech, 2014).

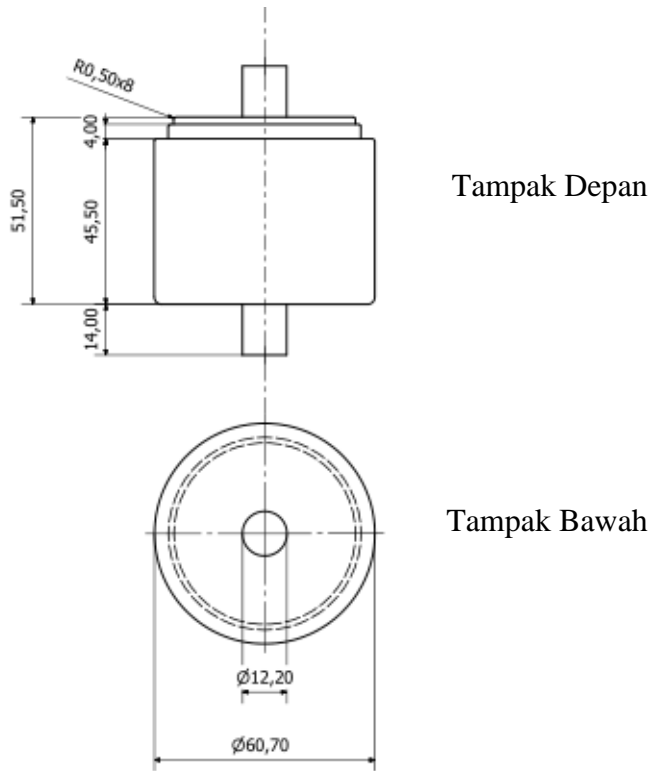
c. Domain Fluida

Domain fluida dibuat dari rangkaian seri *ultracapacitor* sebanyak 8 unit yang disambung dengan *buss bar* dan sebuah *windtunnel* yang melingkupi seluruh rangkaian.

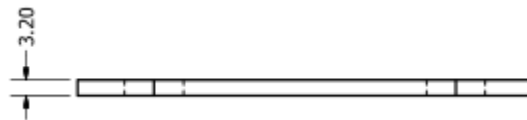
Dalam model ini *ultra capacitor* dimodelkan sebagai sebuah *wall* dengan *region fluid* yang memancarkan panas dengan *heat flux* konstan. Untuk *buss bar* dimodelkan sebagai sebuah *wall* dengan *region solid*. *Buss bar* mengalami perpindahan panas secara konduksi dari panas baterai dan konveksi akibat kontak dengan udara sehingga perlu dibuat *interface* antara *region solid* dengan *region fluid* agar terjadi kontak antara 2 *region* yang berbeda. Untuk *interface* yang digunakan adalah *contact interface*. Untuk bagian yang kontak antara baterai dengan *buss bar* didefinisikan sebagai *heat flux* konstan.



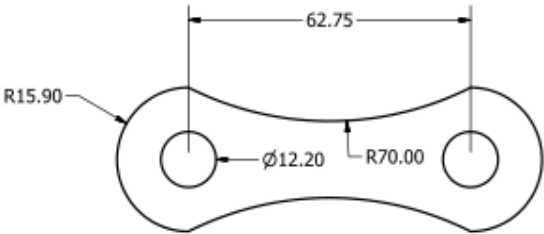
Tampak Atas



Gambar 3.1 Spesifikasi ukuran dalam millimeter (mm)
ultracapacitor Maxwell BCAP0650

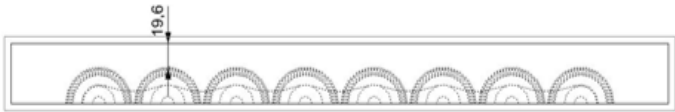


Tampak Atas

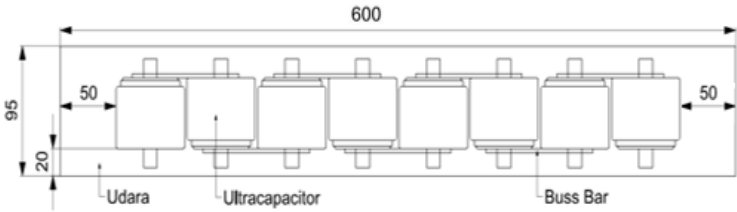


Tampak Depan

Gambar 3.2 Spesifikasi ukuran dalam millimeter (mm) *buss bar*



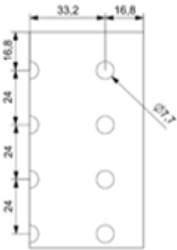
Tampak Atas



Tampak Depan

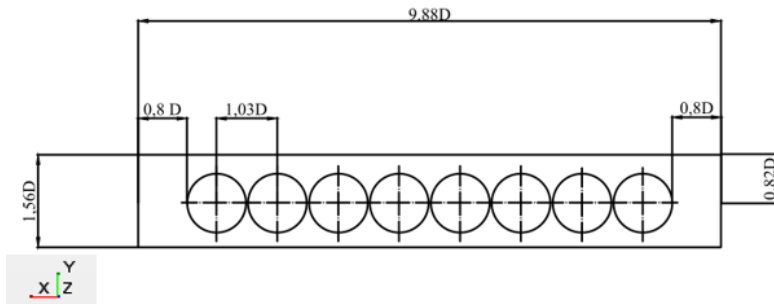


Tampak Samping



Tampak Samping

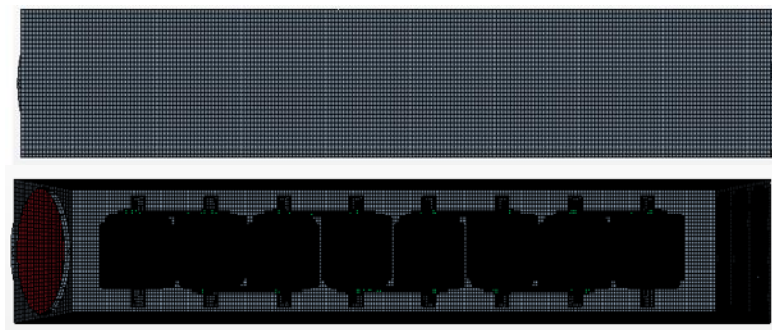
Gambar 3.3 Model domain fluida yang akan diteliti



Gambar 3.4 Ukuran domain simulasi pada *midspan*

3.1.2 Pembuatan *Meshing* dan Pengaturan *Boundary Condition*

Meshing bertujuan membagi geometri yang telah dibuat menjadi elemen – elemen kecil untuk dilakukan perhitungan pada parameter yang ditentukan. Pembuatan meshing pada penelitian ini dengan lebih merapatkan mesh pada bagian bodi *ultracapacitor* karena akan dilakukan pengamatan terhadap fenomena aliran yang terjadi di sekitar *ultracapacitor*. Mesh yang digunakan adalah *trimmed cell mesh* dengan operasi *automated mesh* yang ditunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6.

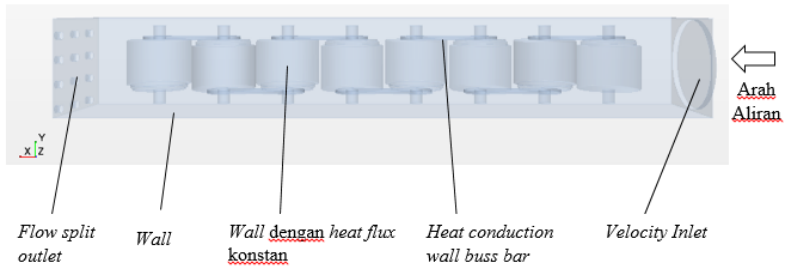


Gambar 3.5 *Mesh* pada simulasi

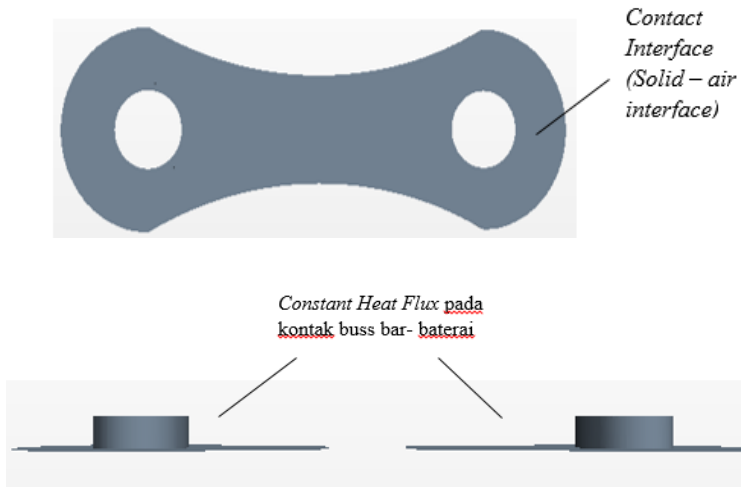


Gambar 3.6 *Mesh* pada *Ultracapacitor*

Sebelum melakukan perhitungan maka geometri yang telah dibuat perlu ditentukan *boundary condition*-nya. *Boundary condition* ini bertujuan menentukan batasan – batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji. Adapun *boundary condition* pada domain fluida ditunjukkan pada gambar 3.7 dan pada domain solid ditunjukkan pada gambar 3.8. Untuk *boundary condition* pada kedua domain dapat dilihat pada tabel 3.1.



Gambar 3.7 *Boundary Condition* pada Domain Simulasi



Gambar 3.8 *Boundary Condition* pada BussBar

Tabel 3.1 *Boundary Condition*

Nama Part	Boundary Condition
Inlet	Velocity Inlet
Wall	Adiabatic Wall
Ultracapacitor	Constant Heat Flux

<i>Buss Bar</i>	<i>Contact Interface (solid – fluid)</i>
<i>Buss bar yang kontak dengan baterai</i>	<i>Constant Heat Flux</i>
<i>Outlet</i>	<i>Flow Split Outlet</i>

3.1.3 Setup

Sebelum melakukan perhitungan, terdapat parameter – parameter yang perlu diatur terlebih dahulu.

1. Model

Pada langkah ini permodelan aliran yang akan digunakan adalah *segregated flow, ideal gas, incompressible flow, segregated fluid temperature* dan *turbulence model K-ε standard* dan *K-ε realizable* dengan *high Y⁺ treatment* dan *K-ε Standard Low – Re* dengan *all Y⁺ treatment* serta kondisi parameter adalah *steady* dengan skema diskritisasi *second order upwind*. Untuk region solid maka yang digunakan adalah *steady, constant density* dan *segregated solid energy*. Pada saat melakukan percobaan *turbulence model*, *K-ω standard* maupun *SST* telah dicoba, namun didapatkan iterasi yang berfluktuasi dan sulit untuk konvergen , sehingga *turbulence model* yang digunakan adalah ketiga jenis model yang telah disebutkan sebelumnya. *Initial condition* pada domain $V = 0 \text{ m/s}$ dan $T = T_{\text{ambient}}$

2. Materials

Pada tabel 3.2 berikut ditunjukkan *properties* dari udara untuk domain fluida yang diambil pada temperature 300 K dan aluminium untuk domain *buss bar*

Tabel 3.2 *materials properties*

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (j/kg-K)	Thermal conductivity (w/m-k)	Viscosity (Pa.s)
<u>udara</u>	1,1614	1007	0,0263	1,855e-05
<u>aluminium</u>	2700	896	167	-

3. Variasi yang digunakan

Kecepatan yang digunakan pada *velocity inlet* divariasikan menjadi 3 kecepatan yang berbeda yang ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Variasi Kecepatan *Inlet*

Debit Fan	<u>Kecepatan Inlet</u>	<u>Rep</u>
0.009 m ³ /s	1.7 m/s	6000
0.018 m ³ /s	3.4 m/s	12000
0.036 m ³ /s	6.8 m/s	24000

Nilai untuk variasi pada *heat flux* didapatkan dari persamaan 3.1 berikut

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (3.1)$$

Dimana q'' adalah *heat flux* (W/m²), A adalah luas permukaan *ultracapacitor* yaitu 0.016357 m², dan q adalah panas yang terbuang (W). nilai q berasal dari persamaan 3.2

$$q = ESR \times I^2 \quad (3.2)$$

Dimana ESR adalah hambatan dalam sebuah *ultracapacitor* (ohm) dan I adalah arus listrik (A) yang bekerja pada *ultracapacitor*. Pada modul ini karena semua *ultracapacitor* satu tipe maka nilai ESR sama untuk setiap *ultracapacitor* yaitu sebesar 0.0008 ohm. Variasi arus listrik yang digunakan adalah sebesar 80 A, 90 A dan 100 A, dimana pada simulasi ini arus listrik diasumsikan konstan. Modul ini disusun oleh *ultracapacitor* yang dirangkai secara seri sehingga arus yang mengalir melewati *ultracapacitor* sama satu dengan lainnya. *Heat flux* yang dihasilkan untuk setiap *ultracapacitor* dalam rangkaian bernilai sama, untuk

setiap arus listrik yang bekerja. Pada tabel 3.4 ditunjukkan variasi *heat flux* yang bekerja berdasarkan arus listrik.

Tabel 3.4 Variasi *heat flux*

<u>Arus</u>	<u>Daya</u>	<i>Heat flux</i>
80 A	5,12 W	313,016 (W/m ²)
90 A	6,48 W	396,161 (W/m ²)
100 A	8 W	489, 87 (W/m ²)

3.2 Processing

Pada tahap ini, parameter – parameter yang telah ditentukan pada tahap *pre – processing* akan dilakukan perhitungan dengan melakukan iterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan, yaitu ketika nilai residual mencapai 1×10^{-4} . Jika kriteria konvergensi sudah dapat dicapai maka selanjutnya adalah melakukan tahap *post – processing*, tetapi apabila belum tercapai maka langkah yang diambil adalah kembali melakukan perbaikan mesh dan penentuan *boundary condition*.

3.3 Post – Processing

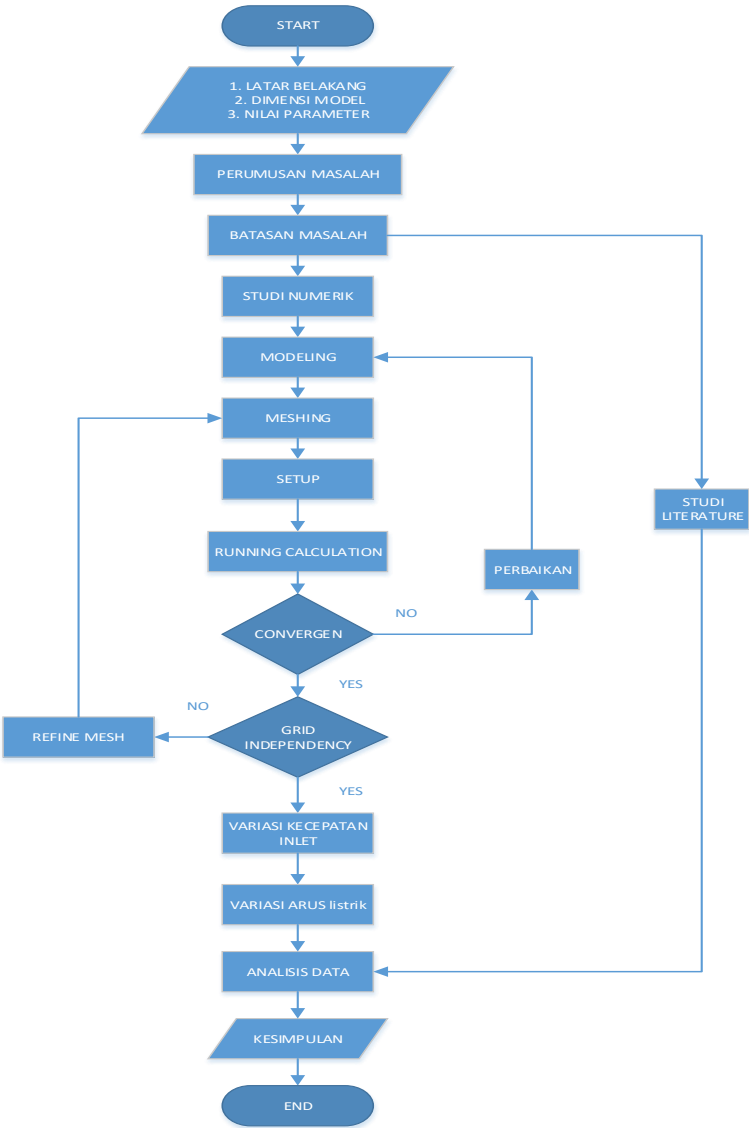
Setelah melakukan iterasi dari tahap sebelumnya, tahap selanjutnya adalah *post – processing*, yaitu pengambilan dan pengolahan data serta menganalisa data visualisasi dari solusi numerik tersebut. Pada tahap ini pula akan dilakukan proses *grid independency* untuk mendapatkan ketepatan data baik pada langkah *post-processing* maupun *pre-processing*. Tujuan dilakukannya *grid independency* yaitu untuk menentukan jumlah grid yang tidak mempengaruhi hasil simulasi.

Langkah selanjutnya adalah pengambilan data. Pengambilan data dilakukan saat kriteria konvergensi yang

ditentukan telah tercapai. Data yang diperoleh dari penelitian ini adalah temperature maksimum dan rata – rata, *Coefficient of drag*, nilai koefisien perpindahan panas konveksi rata - rata pada sel dan koefisien *loss* (K) pada setiap variasi Re. Data yang didapatkan akan dibandingkan dengan hasil dari eksperimen dan penelitian sebelumnya dengan metode numerik.

3.4 Flowchart Penelitian

Pada penelitian ini terdapat diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.9



Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian

BAB 4

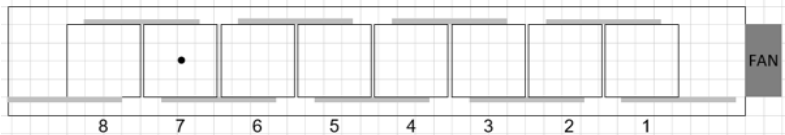
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Grid independency

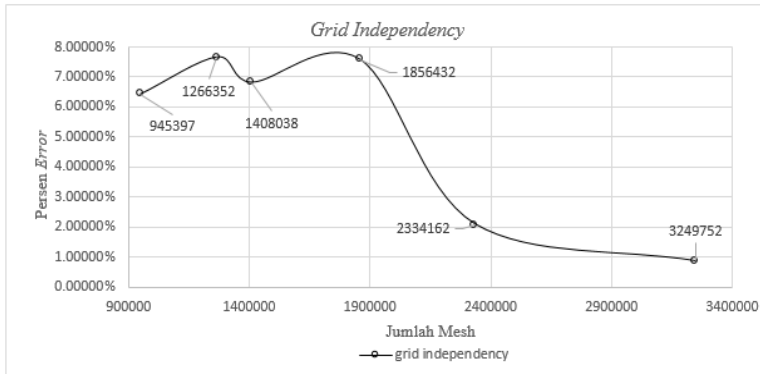
Pada penelitian ini dilakukan tahapan *grid independency* untuk mengetahui jumlah mesh optimum dimana jumlah mesh tersebut sudah tidak memiliki pengaruh terhadap data yang diambil dan memiliki *error* yang paling kecil. *Grid independency* pada penelitian ini dilakukan dengan mengambil data temperatur pada sel nomor 7 yang titik pengambilannya disesuaikan dengan eksperimen yang sudah dilakukan. Titik pengambilan dari penelitian pada selubung sel nomor 7 ditunjukkan pada gambar 4.1. Hasil dari *grid independency* ditunjukkan pada tabel 4.1 dan grafik *grid independency* ditunjukkan pada gambar 4.2 Temperatur pada sel nomor 7 dari hasil eksperimen didapatkan adalah 39°C. Pada tabel hasil *grid independency* error relatif dan persen selisih dengan eksperimen sebagai pertimbangan dalam memilih mesh.

Tabel 4.1 Hasil *Grid independency*

Jumlah Mesh	Temperatur pada sel 7 yang didapatkan (°C)	Error Relatif	Selisih dengan Eksperimen(Lystianingrum,2015)	Persen Selisih
945397	36.496	-	2.504	6.420%
1266352	36.01	1.331%	2.99	7.667%
1408038	36.34	0.916%	2.66	6.820%
1856432	36.04	0.825%	2.96	7.590%
2334162	38.18	5.938%	0.82	2.102%
3249752	38.66	1.257%	0.34	0.872%



Gambar 4.1 Titik Pengambilan Data Temperatur dan Posisi dari *Ultracapacitor*



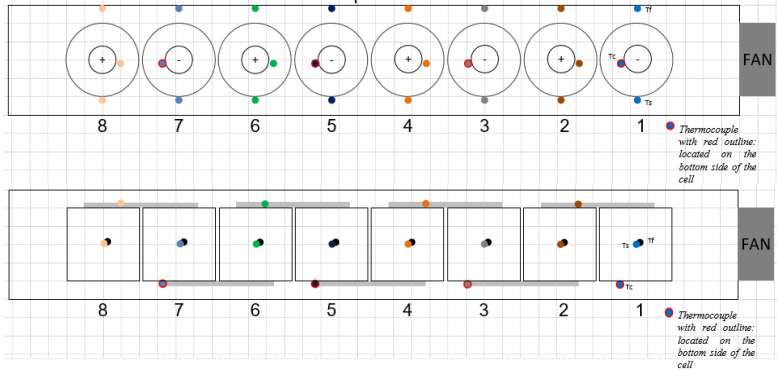
Gambar 4.2 Grafik *Grid independency*

Grid independency ini dilakukan dengan menggunakan data arus listrik dan kecepatan kipas dari eksperimen, yaitu arus listrik sebesar 85 A dan kecepatan kipas 34.1 CFM (*Cubic Feet Minute*) atau setara dengan 2,426 m/s. Dari grafik di atas dapat terlihat bahwa error yang terbesar berada pada jumlah mesh 1266352 dengan nilai *error* sebesar 7.66667% dan nilai error terkecil terdapat pada jumlah mesh 3249752 dengan nilai error sebesar 0.87179%. Dari hasil *grid independency* dan grafik maka jumlah mesh yang dipilih adalah 3249752 karena memiliki error terhadap hasil eksperimen paling kecil.

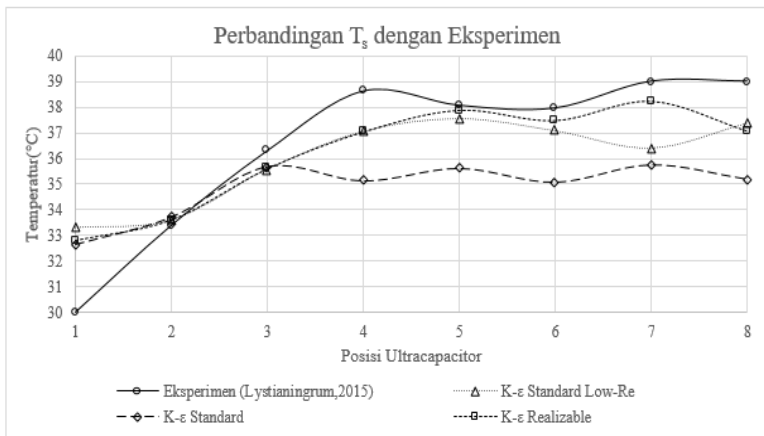
4.2 Perbandingan Hasil Penelitian Terdahulu

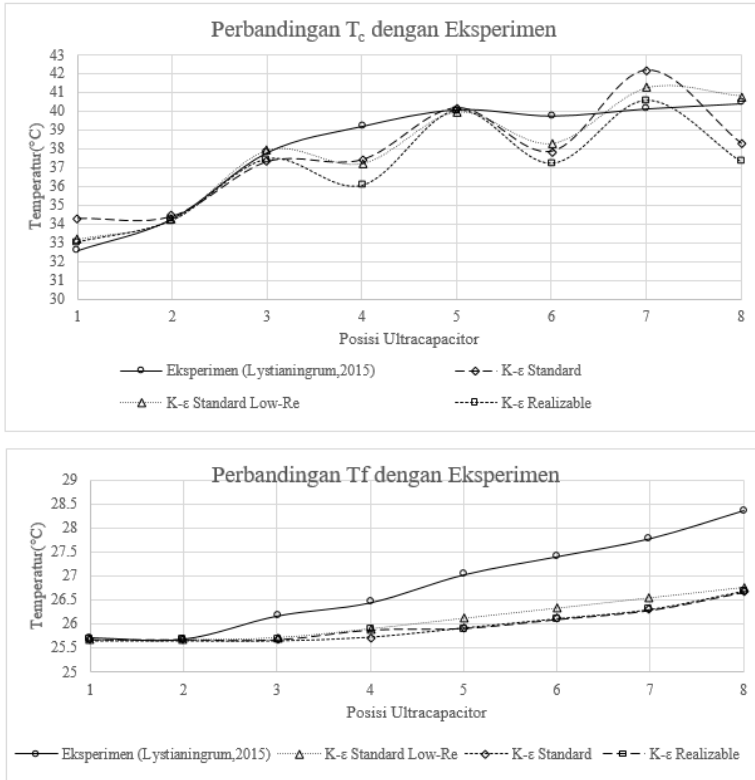
Gambar 4.3 menunjukkan grafik perbandingan antara penelitian ini terhadap hasil eksperimen dan hasil penelitian numerik sebelumnya. Pada perbandingan ini menggunakan arus listrik dan kecepatan yang sama dengan eksperimen, yaitu 85 A dan kecepatan 34.1 CFM (*Cubic Feet Minute*). Dari arus listrik 85A akan menghasilkan heat flux sebesar 353,365 W/m² dan debit yang dikonversikan menjadi satuan SI sehingga didapatkan kecepatan inlet sebesar 2,426 m/s. Pengambilan data temperatur disesuaikan dengan posisi peletakan *thermocouple* pada permukaan *ultracapacitor* seperti yang ditunjukkan pada gambar

4.3. Pada tabel di bawah ini akan ditunjukkan perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu. Perbandingan ini dilakukan sebagai validasi terhadap hasil penelitian dari metode yang digunakan.



Gambar 4.3 Titik Pengambilan Temperatur Pada penelitian





Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Pada gambar 4.4 menunjukkan perbandingan hasil penelitian yang dilakukan terhadap penelitian terdahulu yang dilakukan dengan melakukan eksperimen dan simulasi numerik. Pada hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan perbedaan yang cukup besar pada *ultracapacitor* posisi 1 untuk model turbulensi K- ϵ Standard, K- ϵ Realizable maupun K- ϵ Standard Low-Re. Untuk mengetahui rata – rata *error* yang didapatkan dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode *Root Mean Square* (RMS). Dari hasil perhitungan ini akan digunakan untuk

membandingkan 3 model turbulensi yang digunakan. Hasil yang didapatkan akan ditunjukkan pada tabel 4.2 hingga tabel 4.4.

Tabel 4.2 Nilai RMS T_s pada Setiap Model Turbulensi

Model Turbulensi	RMS Perbandingan dengan Eksperimen (Lystianingrum,2015)
<i>K-ϵ Standard</i>	2.721
<i>K-ϵ Realizable</i>	1.380
<i>K-ϵ Standard Low - Re</i>	1.728

Tabel 4.3 Nilai RMS T_c pada Setiap Model Turbulensi

Model Turbulensi	RMS Perbandingan dengan Eksperimen (Lystianingrum,2015)
<i>K-ϵ Standard</i>	1.531
<i>K-ϵ Realizable</i>	1.834
<i>K-ϵ Standard Low - Re</i>	0.993

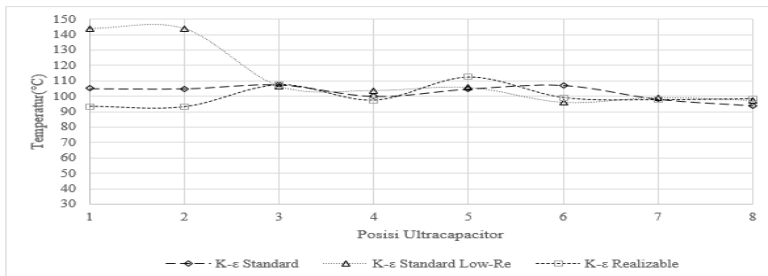
Tabel 4.4 Nilai RMS T_f pada Setiap Model Turbulensi

Model Turbulensi	RMS Perbandingan dengan Eksperimen (Lystianingrum,2015)
<i>K-ϵ Standard</i>	1.044
<i>K-ϵ Realizable</i>	1.052
<i>K-ϵ Standard Low - Re</i>	0.916

Pada tabel di atas terlihat bahwa nilai RMS terbesar berada pada model turbulensi *K- ϵ Standard*, sedangkan yang terkecil

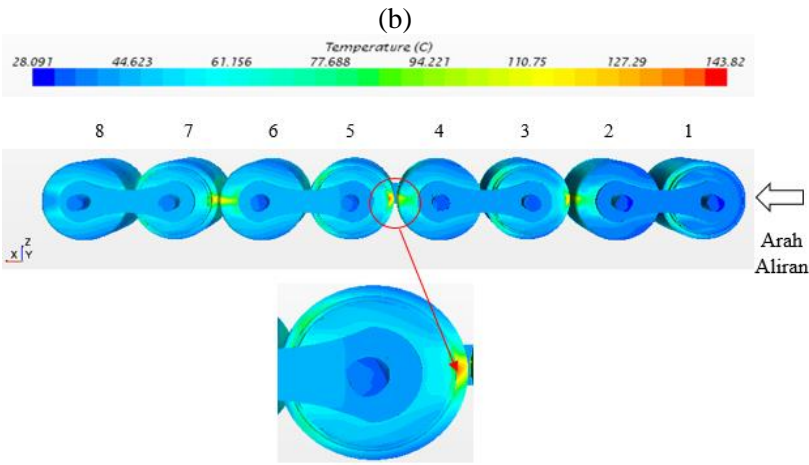
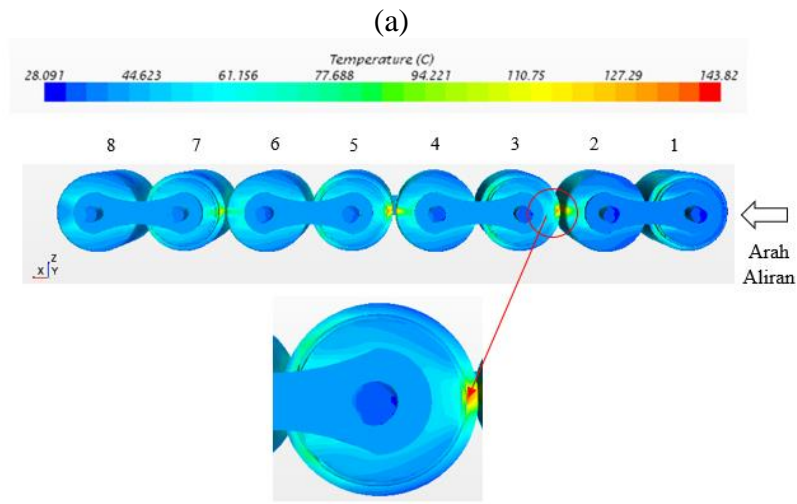
diperoleh pada model turbulensi K- ϵ *Realizable*. Semakin besar nilai dari RMS, maka makin besar pula perbedaan rerata pada setiap data yang didapatkan dengan data acuan yang digunakan. Pada grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.4 juga terlihat kurva dari model turbulensi K- ϵ *Standard* memiliki tren yang fluktuatif, sehingga tidak berhimpit dengan nilai dari hasil eksperimen maupun hasil simulasi terdahulu. Pada model turbulensi K- ϵ *Realizable* dan K- ϵ *Standard Low – Re* kurva yang didapatkan berhimpit dengan kurva penelitian sebelumnya, walaupun pada *ultracapacitor* posisi 1, model K- ϵ *Standard Low – Re* memiliki perbedaan yang cukup besar. Namun pada saat perbandingan dengan nilai dari T_c dan T_f model turbulensi K- ϵ *Standard Low – Re* memiliki nilai RMS yang paling kecil, sedangkan yang terbesar adalah pada model K- ϵ *Realizable*. Nilai T_f yang cukup berbeda diakibatkan pada simulasi daerah *wall* pada *windtunnel* dapat dibuat adiabatik, sedangkan pada eksperimen kemungkinan *wall*-nya masih dapat menghantar panas.

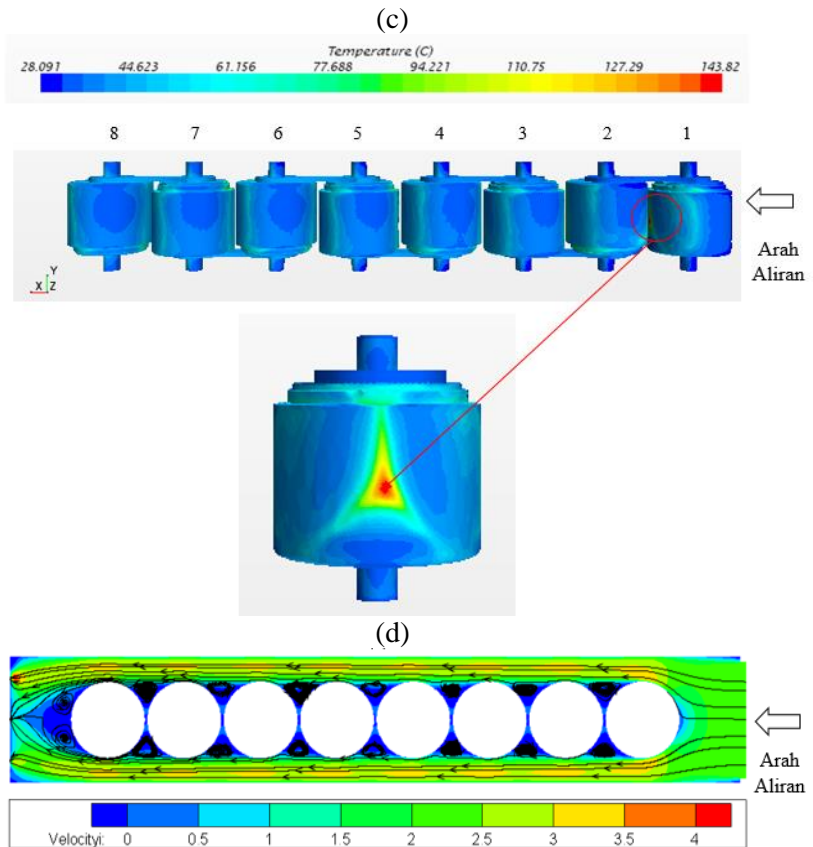
Pada penelitian ini juga akan ditampilkan T_{maks} pada setiap *ultracapacitor* dimana dengan hasil ini dapat terlihat posisi dari susunan *ultracapacitor* yang perlu diletakkan sensor *thermocouple* dan serta mengetahui seberapa efektif debit kipas yang digunakan dalam menjaga temperatur kerja dari *ultracapacitor*. Grafik temperatur maksimum pada setiap *ultracapacitor* ditampilkan pada gambar 4.5 Nilai dari debit pada kipas 34.1 CFM \approx nilai bilangan Re_D 10000.



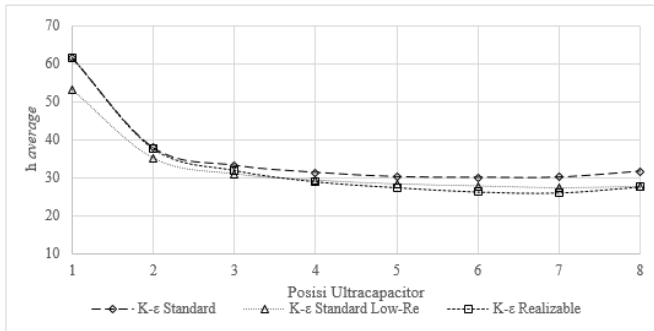
Gambar 4.5 Grafik Temperatur Maksimum Arus Listrik 85A Re 10000

Letak dari temperatur tertinggi dari ketiga model turbulensi yang berbeda pada model. Pada model turbulensi K- ϵ *Standard* temperatur tertinggi terletak pada *ultracapacitor* nomor 3, pada model K- ϵ *Standard Low* – Re terletak pada *ultracapacitor* nomor 1 dan pada model K- ϵ *Realizable* berada pada *ultracapacitor* 8. Model turbulensi K- ϵ *Standard* memiliki kemiripan kurva dengan kurva model K- ϵ *Standard Low* – Re pada awalnya, kemudian setelah melewati sel nomor 4 temperatur pun kembali turun, sedangkan pada K- ϵ *Standard Low* – Re mengalami kenaikan. Pada model K- ϵ *Standard Low* – Re prediksi dari separasi aliran terlalu cepat sehingga aliran yang melewati sel nomor 1 sudah terseparasi di depan bodi *ultracapacitor* yang menyebabkan perpindahan panas konveksi dari *ultracapacitor* tidak maksimal. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.4 dimana terjadi perbedaan temperatur yang cukup besar pada sel nomor 1 dibandingkan dengan simulasi terdahulu maupun eksperimen. Letak dari daerah *ultracapacitor* yang terjadi temperatur maksimum ditunjukkan pada gambar 4.6a hingga c untuk ketiga model turbulensi yang digunakan. Untuk profil aliran yang melewati bodi *ultracapacitor* sendiri dapat dilihat pada gambar 4.6d. Untuk mengetahui besar dari laju perpindahan panas secara konveksi, maka dapat dilihat melalui nilai koefisien perpindahan panas konveksi (h) pada gambar 4.7. Selain dari melihat grafik koefisien perpindahan panas konveksi, perlu juga dilihat nilai dari C_d , sehingga dapat diprediksi posisi sel yang memiliki temperatur tertinggi dalam susunan, karena semakin besar C_d menandakan aliran tersebut mudah terseparasi. Nilai dari C_d dapat dilihat pada gambar 4.8.

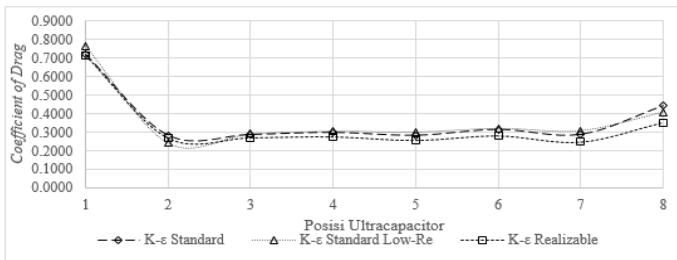




Gambar 4.6 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 85A Re 10000 (a) K- ϵ Standard (b) K- ϵ Realizable (c) K- ϵ Standard Low – Re (d) Streamline pada Susunan *Ultracapacitor*

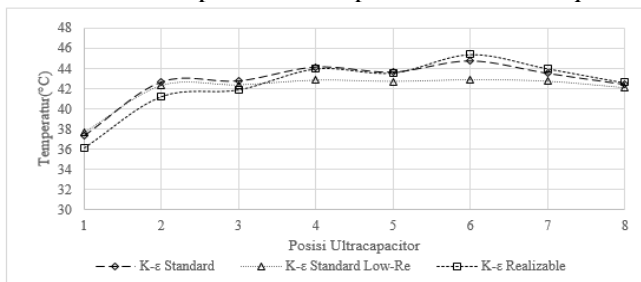


Gambar 4.7 Nilai dari $h_{average}$ Arus Listrik 85A pada Re 10000



Gambar 4.8 Cd Arus Listrik 85A pada Re 10000

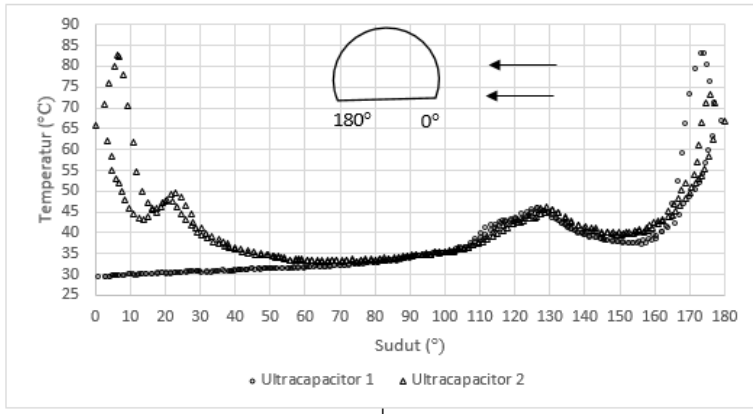
Distribusi temperatur dari *ultracapacitor* dapat dilihat pada gambar 4.9 dimana temperatur yang ditampilkan merupakan temperatur rata – rata pada seluruh permukaan *ultracapacitor*.



Gambar 4.9 Distribusi Temperatur Rata – Rata Arus Listrik 85A Re 10000

Dari grafik yang ditampilkan terlihat terjadi kenaikan yang signifikan dari posisi pertama menuju kedua mengalami penurunan dari posisi ketujuh menuju kedelapan. Dari ketiga model turbulensi, model $K-\varepsilon$ *Standard* dan $K-\varepsilon$ *Realizable* memiliki tren kurva yang cenderung fluktuatif, sedangkan pada model $K-\varepsilon$ *Standard Low* – Re tren kurva lebih stabil.

Kenaikan temperatur dari posisi pertama menuju kedua disebabkan karena pada susunan *ultracapacitor* ini memiliki jarak celah yang sangat kecil. Pada antara jarak yang kecil terbentuk *closed vortex region* menyebabkan aliran berpusar yang memiliki kecepatan rendah di dalam celah dan tidak dapat keluar, sehingga transfer panas yang terjadi kurang baik, sehingga *ultracapacitor* pada posisi selanjutnya menerima panas yang disalurkan dari posisi pertama melalui *vortex* yang terjadi. Akibat dari hal tersebut adalah kenaikan temperatur yang cukup tinggi. Pada celah yang sempit, aliran tidak dapat melakukan *recovery* kemudian kembali *attach* dengan momentum yang lebih besar sehingga yang terjadi adalah pada posisi kedua hanya menerima pusaran dari daerah *wake* pada posisi pertama. Setelah melewati posisi kedua akibat celah yang sempit perpindahan panas yang terjadi masih kurang baik, sehingga temperatur pada posisi berikutnya relatif sama dengan posisi kedua. Namun pada posisi ketujuh menuju posisi kedelapan, karena posisi kedelapan tidak terdapat *ultracapacitor* lagi menyebabkan aliran dapat *attach* lagi sehingga temperatur dapat kembali turun pada posisi 8 sebelum akhirnya terseparasi pada daerah belakang. Selain itu, distribusi temperatur pada *midspan* ditunjukkan pada gambar 4.10 sebagai fungsi dari sudut pada *ultracapacitor* pertama dan kedua serta pada gambar 4.11 ditunjukkan gambar distribusi temperatur pada *ultracapacitor* 6, 7 dan 8. Perpindahan panas konveksi terhadap sudut ditunjukkan pada gambar 4.12 dan 4.13.

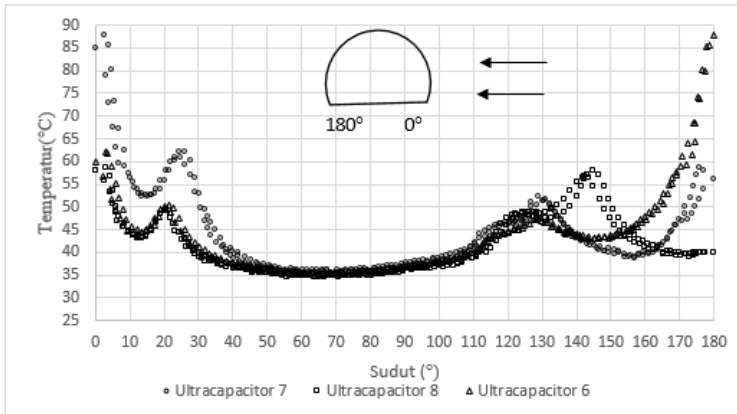


Gambar 4.10 Distribusi Temperatur terhadap Sudut pada *Midspan* pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi *Ultracapacitor* 1 dan 2

Dari grafik temperatur rata – rata pada gambar 4.9 dimana terjadi kenaikan temperatur pada *ultracapacitor* pertama menuju kedua yang cukup besar. Kenaikan temperatur yang cukup tinggi disebabkan oleh daerah *wake* di belakang *ultracapacitor* pertama dimana aliran terseparasi pada daerah depan dari *ultracapacitor* sehingga tidak ada aliran lagi yang melewati daerah antara 2 *ultracapacitor*.

Pada daerah depan dari *ultracapacitor* kedua tidak dilewati oleh aliran/ Saat terjadi separasi momentum aliran sudah tidak dapat melawan tegangan geser yang dialami dan laju perpindahan panas menjadi turun pada sudut 0° pada *ultracapacitor* kedua karena pada daerah tersebut hanya menerima *wake* dari aliran sebelumnya dimana pada daerah *wake* merupakan daerah yang bertekanan rendah dan memiliki kecepatan rendah. Pada sudut sekitar 20°, temperature pada *ultracapacitor* kedua mulai turun karena pada saat terjadi separasi dari *ultracapacitor* sebelumnya terjadi percabangan dimana terdapat aliran yang masuk menuju celah antara 2 *ultracapacitor* dan terdapat juga yang *attach* pada *ultracapacitor* kedua tetapi walaupun ada aliran yang *attach*

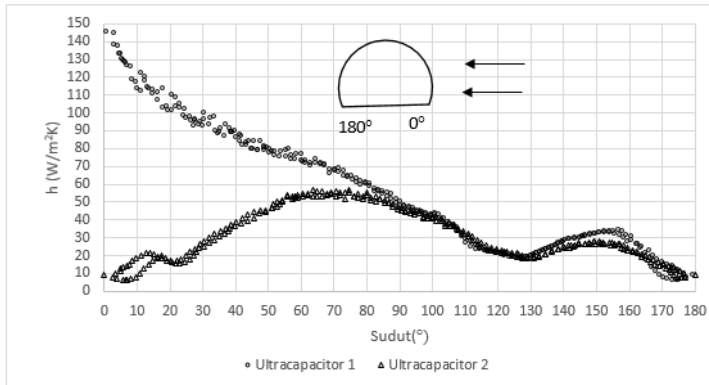
temperatur pada sekitar daerah tersebut tinggi karena menerima panas dari *ultracapacitor* pertama dan ketiga.



Gambar 4.11 Distribusi Temperatur terhadap Sudut pada *Midspan* pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi *Ultracapacitor* 6, 7 dan 8

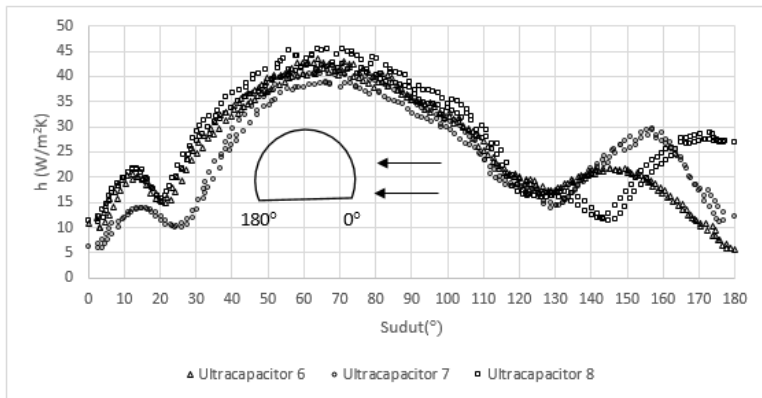
Pada grafik temperature rata – rata pada gambar 4.9 terlihat bahwa *ultracapacitor* keenam memiliki temperatur tertinggi. Hal ini sesuai dengan gambar 4.11 dimana pada *ultracapacitor* keenam memiliki temperatur paling tinggi, walaupun selisih dengan *ultracapacitor* ketujuh cukup kecil. Pada *ultracapacitor* keenam menjadi *ultracapacitor* dengan temperatur rata – rata tertinggi karena pada posisi ini *ultracapacitor* keenam menerima kumpulan panas akibat dari sifat difusif dari aliran turbulen serta juga kumpulan panas dari *ultracapacitor* sebelumnya selain itu juga pada *ultracapacitor* keenam sendiri terdapat pusaran yang cukup besar pada daerah celah antara *ultracapacitor* 5 dan 6 serta pada daerah antara *ultracapacitor* 6 dan 7. Dengan pusaran yang besar, maka turbulensi yang dialami aliran akan semakin besar sehingga difusivitas semakin besar yang mengakibatkan panas dari sebelumnya ikut terbawa dan terkumpul pada *ultracapacitor* keenam, pada *ultracapacitor* 7 pun terjadi demikian, namun pusaran pada daerah antara 7 dan 8 tidak sebesar pada daerah *ultracapacitor* 6. Setelah melewati *ultracapacitor* ketujuh, pada

daerah di belakang *ultracapacitor* 8 sudah tidak terdapat lagi benda sehingga daerah pusaran di belakang *ultracapacitor* 8 tidak terperangkap. Akibatnya panas yang dihasilkan dapat ditransfer lebih baik sehingga temperature akan turun. Namun aliran pada daerah belakang tidak dapat *recover* menjadi *fully developed* karena jarak dari windtunnel yang terlalu kecil untuk memungkinkan aliran terbentuk hingga menjadi *fully developed flow*.



Gambar 4.12 Distribusi Koefisien Perpindahan Panas terhadap Sudut pada *Midspan* pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi *Ultracapacitor* 1 dan 2

Pada grafik di atas terlihat pada *ultracapacitor* 1 memiliki koefisien perpindahan panas konveksi (h) yang tinggi dibandingkan dengan *ultracapacitor* kedua karena pada posisi pertama paling banyak menerima aliran dibandingkan pada daerah di belakangnya. Pada *ultracapacitor* kedua hanya menerima turbulensi dari *ultracapacitor* pertama dimana momentum yang tersisa sangat sedikit pada daerah 0° hingga 30° . Pada sudut $30^\circ < \theta < 75^\circ$ terjadi peningkatan nilai h karena aliran yang melewati *ultracapacitor* pertama menuju kedua terjadi percabangan dimana terdapat sebagian aliran yang masuk pada *closed vortex region*, juga terdapat aliran yang *re-attach* pada *ultracapacitor* 2 sehingga nilai h meningkat dan akhirnya turun pada sudut sekitar 80° akibat terseparasi.



Gambar 4.13 Distribusi Koefisien Perpindahan Panas terhadap Sudut pada *Midspan* pada Arus Listrik 85A Re 10000 pada Posisi *Ultracapacitor* 6,7 dan 8

Pada gambar 4.13 terlihat distribusi h pada *ultracapacitor* 6 dan pada *ultracapacitor* 7 memiliki distribusi yang sama, hanya terjadi perbedaan nilai yang tidak terlalu besar. Pada daerah belakang dari kedua *ultracapacitor* mengalami penurunan nilai h . Hal ini dikarenakan pada daerah belakang dari kedua *ultracapacitor* ini memiliki *closed vortex region*. Akibatnya pusaran pada daerah *wake* terperangkap dan pada daerah tersebut memiliki momentum aliran yang rendah. Kurva dari distribusi temperatur berbanding terbalik dengan distribusi h . Semakin besar nilai h maka semakin kecil temperatur. Hal ini menunjukkan semakin besar h maka pendinginan semakin baik karena panas dapat ditransfer melalui fluida. Pada *ultracapacitor* 8 mengalami kenaikan nilai karena aliran dari *ultracapacitor* sebelumnya *attach* lalu terjadi separasi yang pada grafik ditandai dengan penurunan nilai h . Pada daerah belakang *ultracapacitor* 8 ($145^\circ < \theta < 180^\circ$) mengalami kenaikan nilai h setelah sebelumnya mengalami penurunan. Kenaikan ini disebabkan karena pada daerah belakang *ultracapacitor* 8 setelah melewati *wake region*, aliran terjadi *recovery* dan bila diberi jarak yang cukup maka aliran dapat kembali menjadi *fully developed flow*. Sehingga transfer panas

yang terjadi lebih baik dan didapatkan hasil pendinginan yang lebih baik.

4.3 Pengaruh Bilangan *Reynolds* pada Arus Listrik Konstan 100A

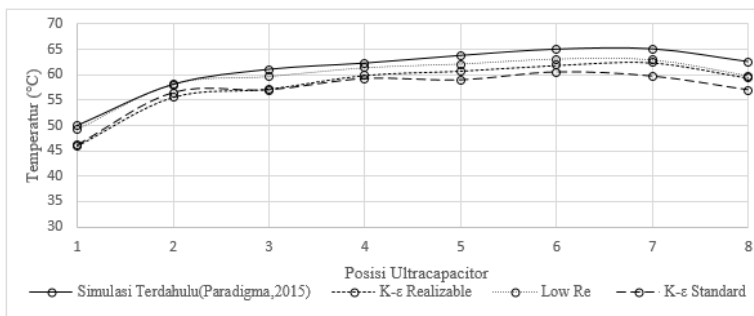
4.3.1 Distribusi Temperatur

Pada subbab ini akan dibahas pengaruh bilangan *Reynolds* terhadap arus listrik konstan 100A. Bila arus listrik ini dikonversikan menjadi *heat flux* akibat dari daya terdissipasi maka akan didapatkan nilai sebesar 489,87 W/m² dimana nilai *heat flux* ini konstan dan uniform pada seluruh permukaan *ultracapacitor*. Nilai *heat flux* ini sendiri didapatkan dari daya terdissipasi (P) pada *ultracapacitor*, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

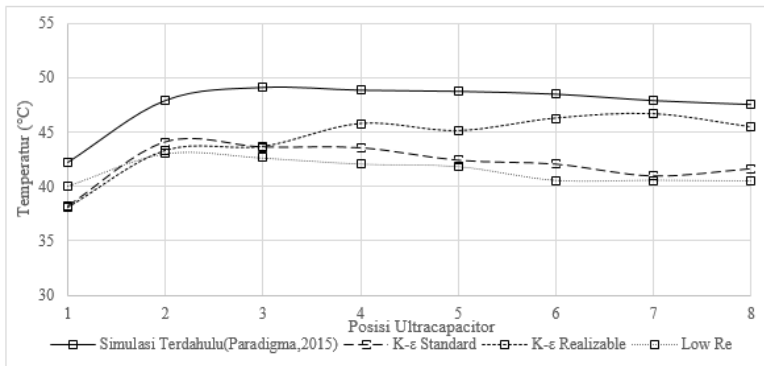
$$P = ESR \times I^2$$

$$q'' = \frac{q}{A}$$

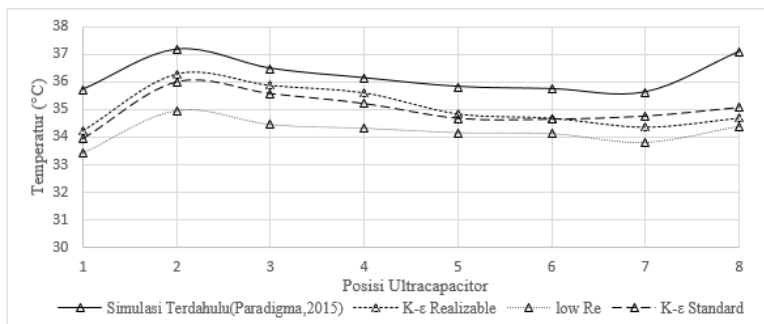
(a)



(b)



(c)



Gambar 4.14 Pengaruh Bilangan *Reynolds* pada Arus Listrik 100 A Terhadap Temperatur Rata – Rata (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000

Pengambilan data $T_{\text{rata-rata}}$ dilakukan pada seluruh permukaan *ultracapacitor*. Pada penelitian ini, nilai dari hasil simulasi yang dilakukan memiliki nilai yang lebih rendah daripada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Paradigma. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.14. Pada penelitian akan dilakukan perbandingan pada model turbulensi yang digunakan terhadap hasil dari Paradigma. Pada model turbulensi K- ϵ *Standard Low* –

Re memiliki kurva yang memiliki tren yang sama dengan penelitian sebelumnya. Kurva dari model turbulensi ini berhimpit pada Re 6000, namun pada bilangan Re 12000 dan 24000 memiliki perbedaan yang cukup besar. Untuk model turbulensi $K-\epsilon$ *Standard* dan $K-\epsilon$ *Realizable* memiliki tren kurva yang berbeda pada Re 12000, namun pada bilangan Re 12000 dan 24000 memiliki kurva yang lebih berhimpit dengan penelitian terdahulu.

Untuk memperjelas perbedaan antara simulasi terdahulu dengan hasil penelitian yang didapatkan maka dibuat dalam persen selisih dari model turbulensi yang digunakan terhadap penelitian terdahulu. Persen selisih rata-rata ini ditampilkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Persen Selisih Rata-Rata Temperatur *average* terhadap Simulasi Terdahulu (Paradigma,2015)

Model Turbulensi	Nilai Re_D		
	6000	12000	24000
$K-\epsilon$ <i>Standard</i>	6.66%	11.61%	3.41%
$K-\epsilon$ <i>Realizable</i>	5.12%	7.01%	3.33%
$K-\epsilon$ <i>Standard Low-Re</i>	2.29%	11.58%	5.56%

Pada tabel 4.5 didapatkan persen selisih terkecil untuk bilangan Re_D yang kecil berada pada model $K-\epsilon$ *Standard Low-Re*, sedangkan untuk bilangan Re_D yang lebih tinggi model yang lebih baik adalah $K-\epsilon$ *Realizable* karena memiliki persen selisih terkecil pada Re_D 12000 dan 24000.

Dari ketiga grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.14 nilai $T_{s_{rata-rata}}$ yang tertinggi berada pada nilai Re 6000 dan nilai $T_{s_{rata-rata}}$ terendah didapatkan pada nilai Re 24000. Pada Re 6000 tren kurva dari penelitian ini sudah mendekati sama dengan penelitian Paradigma. Namun pada nilai Re 12000, kurva memiliki perbedaan tren dimana terjadi kenaikan pada hasil yang didapatkan dengan model turbulensi $K-\epsilon$ *Standard* dan $K-\epsilon$ *Realizable*, sedangkan

pada penelitian Paradigma tren kurva yang didapatkan mengalami penurunan.

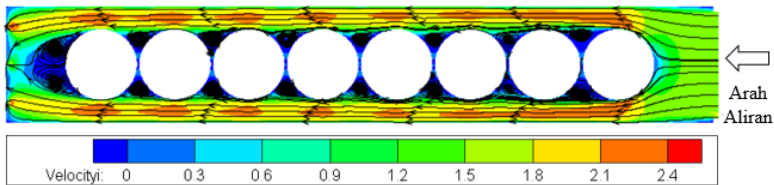
Dari ketiga bilangan Re yang memiliki perpindahan panas yang paling baik adalah pada bilangan Re 24000. Semakin besar nilai dari Re maka semakin besar nilai dari Nu karena sesuai dengan persamaan

$$Nu = C.Re^m.Pr^n$$

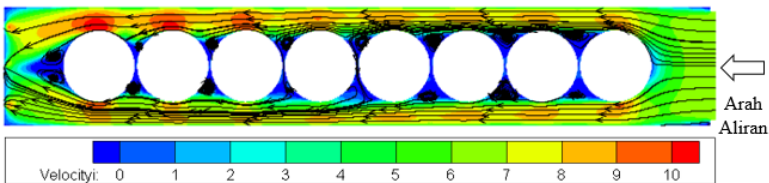
Semakin besar nilai dari bilangan Nu, maka koefisien perpindahan panas konveksi (h) akan semakin besar, sehingga laju perpindahan panas akan semakin meningkat yang menyebabkan panas yang dihasilkan oleh *ultracapacitor* cepat dipindahkan keluar dari susunan *ultracapacitor*. Pengaruh dari turbulensi juga membantu terjadinya perpindahan panas yang lebih cepat. Pada aliran turbulen, terdapat difusi dan disipasi. Difusi menyebabkan terjadinya pencampuran yang terus – menerus serta meningkatkan laju dari momentum, perpindahan panas dan massa, sehingga terjadinya olakan mempercepat terjadinya transfer energi. Untuk disipasi, pergerakan aliran saat melewati sebuah benda akan dikenai tegangan geser, sehingga tercipta energi panas akibat dari gesekan fluida dengan benda yang dilalui. *Turbulent kinetic energy* (TKE) ini akan ditransfer melalui *eddy*, yaitu aliran yang berpusar dari *eddy* yang besar menuju *eddy* yang kecil. Laju transfer dari *eddy* sendiri bergantung pada perkalian energi dan frekuensi dari rotasi.

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa pada Re 6000 dan 12000 terjadi kenaikan temperatur rata – rata pada daerah belakang dari susunan *ultracapacitor*. Aliran yang melewati *ultracapacitor* pertama memiliki profil kecepatan yang belum *fully developed*, sehingga masih terjadi perubahan profil kecepatan secara terus menerus. Akibatnya setelah mengalami separasi pada *ultracapacitor* pertama maka posisi sel *ultracapacitor* kedua berada pada daerah *wake* dan seterusnya energi dari aliran untuk melawan tegangan geser telah habis. Pada daerah belakang

ultracapacitor yang pertama terbentuk *wake*, sehingga pada *ultracapacitor* kedua tidak mendapatkan cukup aliran fluida untuk mentransfer panas yang dihasilkan. Walaupun terseparasi, aliran ini akan mengalami *re-attachment* pada jarak tertentu, pada Re dengan nilai 6000 dan 12000 sempat terjadi *re-attachment* dan kemudian terseparasi kembali pada sel nomor 8. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.14 dimana temperatur pada sel tersebut kembali turun karena pada daerah belakang yang masih terdapat aliran yang mengalir sehingga membantu dalam mentransfer panas secara konveksi, sedangkan pada Re 24000 *wake* region yang terbentuk di belakang sel nomor 1 lebih rendah sehingga pendinginan pada sel nomor 2 dan di belakangnya lebih baik. Pada bilangan Re 24000 terjadi separasi lagi pada daerah belakang sel nomor 8 sehingga pada *ultracapacitor* paling belakang temperatur kembali akan naik. Untuk menunjukkan hal tersebut, dapat dilihat pada gambar 4.15 dan 4.16 dimana gerakan dari aliran diambil pada posisi *midspan*.



Gambar 4.15 *Streamline* pada Bilangan Re 6000 pada *Midspan*

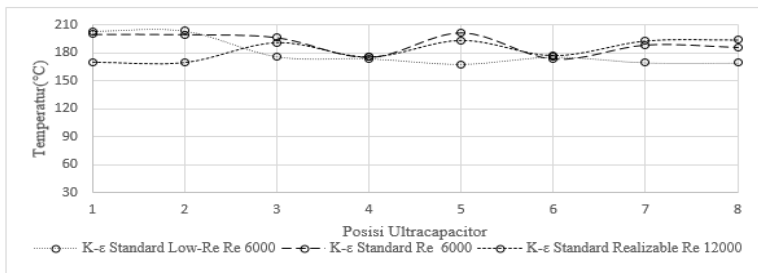


Gambar 4.16 *Streamline* pada Bilangan Re 24000 pada *Midspan*

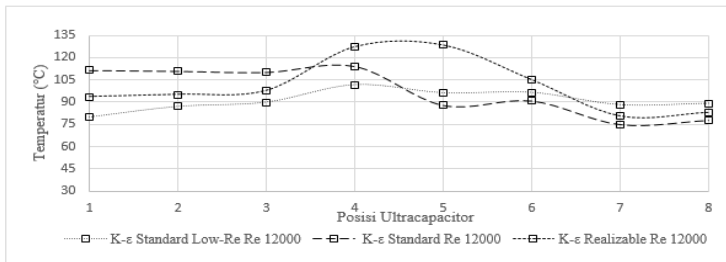
4.3.2 Letak Temperatur Maksimum

T_{maks} yang didapatkan merupakan temperatur maksimum yang diambil pada seluruh permukaan *ultracapacitor*. Gambar 4.15 menunjukkan temperatur maksimum yang diperoleh pada setiap *ultracapacitor* bilangan Re. Dari ketiga variasi bilangan Re, memiliki posisi T_{maks} yang berbeda – beda.

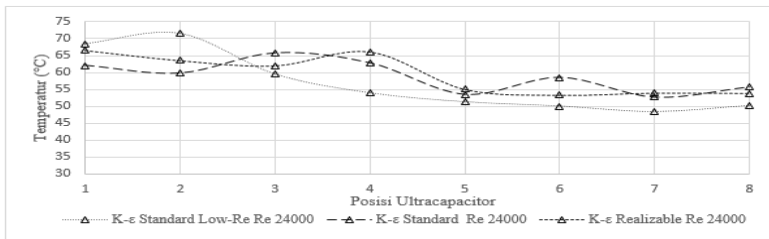
(a)



(b)



(c)

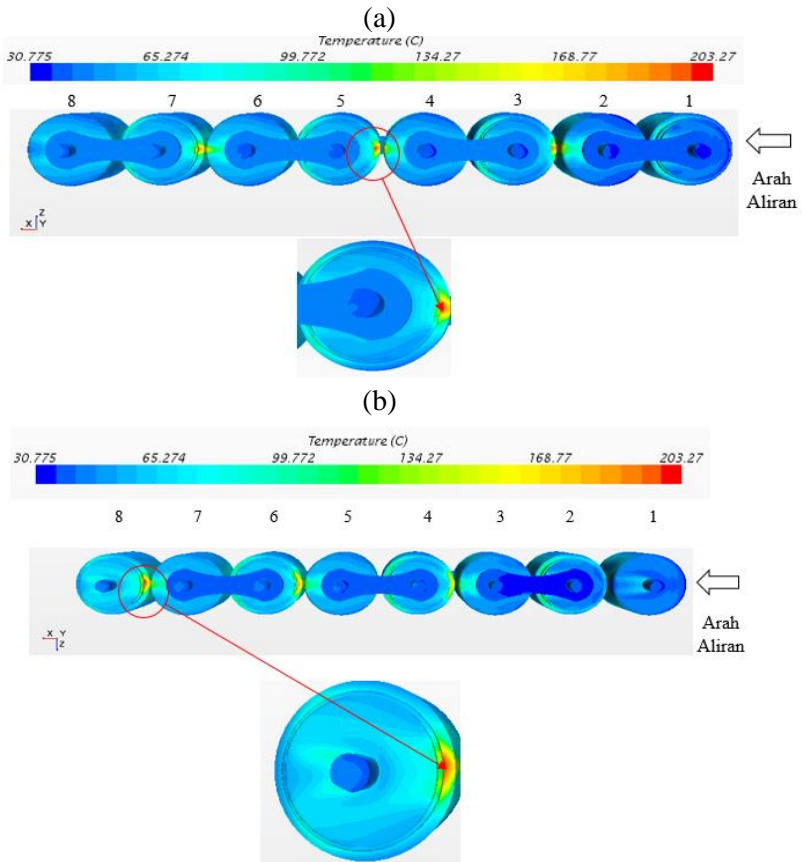


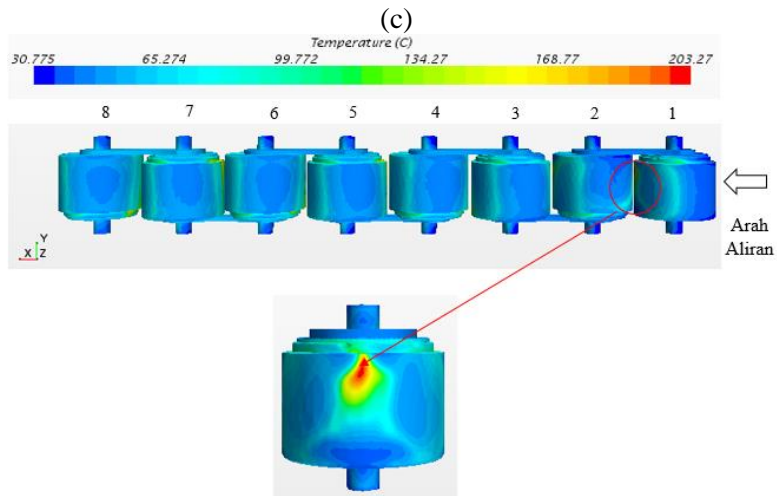
Gambar 4.17 Grafik Temperatur Maksimum pada Setiap Nilai Re Arus Listrik 100A (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000

Semakin besar nilai Re maka T_{maks} pada seluruh susunan *ultracapacitor* akan bergeser semakin mendekati inlet. Hal ini terjadi pada model turbulensi *K-ε Standard* dan *K-ε Realizable*. Pada model *K-ε Standard Low-Re*, letak dari temperatur maksimum cenderung sama pada ketiga variasi Re dimana pada Re 6000 dan 24000 memiliki letak T_{maks} pada sel nomor 2, namun pada Re 12000 letak T_{maks} bergeser pada sel nomor 4. Jarak antara inlet dengan *ultracapacitor* yang pertama hanya 50 mm dimana jarak tersebut masih belum dapat membuat aliran menjadi *fully developed flow* sehingga terjadi yang lebih cepat dari yang seharusnya. Separasi terjadi karena momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser antara permukaan benda padat dan fluida. Akibat dari separasi, akan terbentuk *wake* pada aliran sehingga aliran tidak dapat melewati celah sempit diantara *ultracapacitor* yang menyebabkan terjadinya daerah dengan temperatur tertinggi. Selain itu aliran akan lebih sulit *re-attach* pada permukaan *ultracapacitor* selanjutnya karena energi untuk kembali sudah habis akibat tegangan geser. Semakin turbulen suatu aliran maka transfer panas secara konveksi pun akan terjadi semakin mudah dan cepat. Selain itu bila aliran semakin turbulen maka momentum yang dimiliki aliran lebih besar sehingga mampu untuk melawan tegangan geser lebih lama sehingga separasi yang terjadi dapat tertunda. Pada bilangan Re yang paling tinggi, yakni 24000 separasi dari aliran dapat ditunda hingga agak ke belakang *ultracapacitor*, dan pada bilangan Re ini memungkinkan aliran untuk *re-attach* pada *ultracapacitor* selanjutnya sehingga *ultracapacitor* yang di belakang dapat memiliki temperatur yang lebih rendah daripada yang berada di depan. Namun hasil yang didapatkan pada penelitian tidak dapat dibandingkan dengan hasil simulasi terdahulu yang dilakukan oleh Paradigma karena data mengenai posisi T_{maks} tidak disajikan.

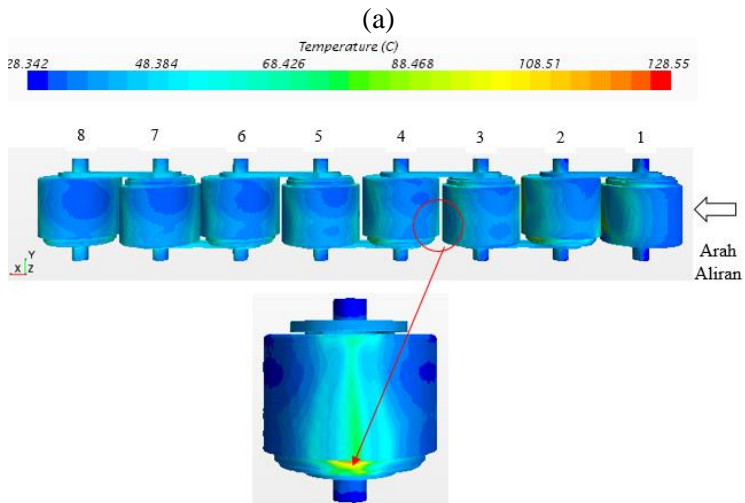
Dengan mengetahui posisi nomor sel dengan temperatur tertinggi dapat dilakukan pengawasan lebih pada saat penggunaan

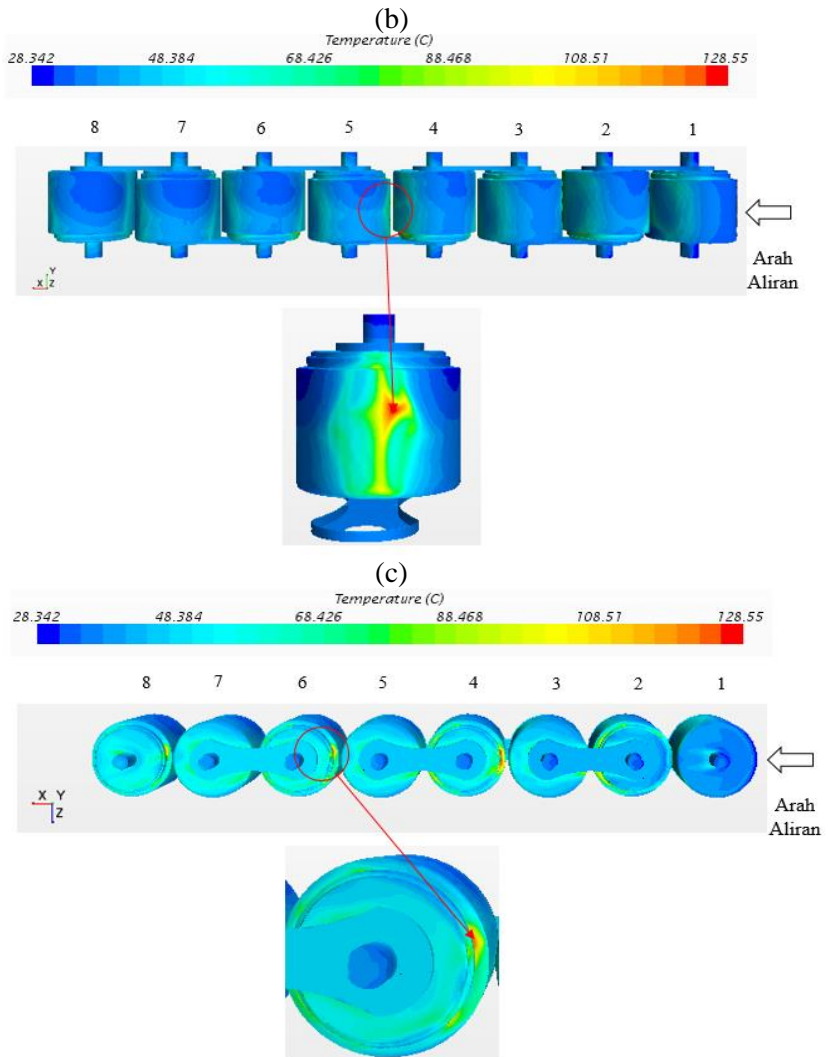
ultracapacitor pada nilai arus listrik yang tinggi. Pengawasan dapat dilakukan dengan meletakkan sensor pada daerah yang dekat dengan *ultracapacitor* yang memiliki temperatur tertinggi sehingga arus listrik yang bekerja pada *ultracapacitor* tersebut dapat diturunkan. Selain itu juga dapat ditambahkan pendinginan pada daerah tersebut agar *ultracapacitor* tetap dapat aman dalam rentang temperatur kerja maksimumnya. Letak dari daerah dengan temperature tertinggi ditunjukkan pada gambar 4.16, 4.17, dan 4.18.



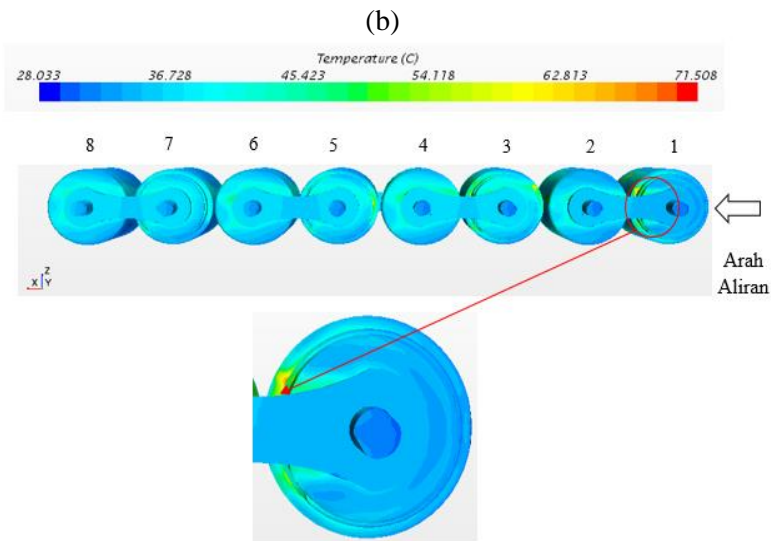
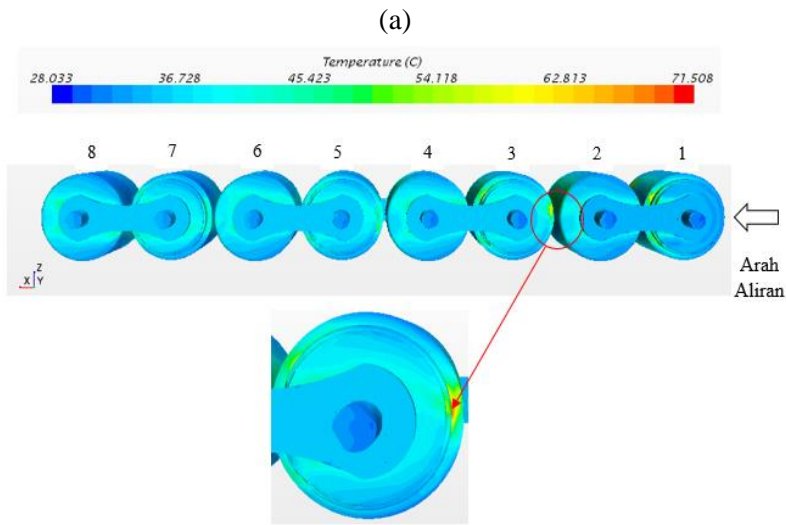


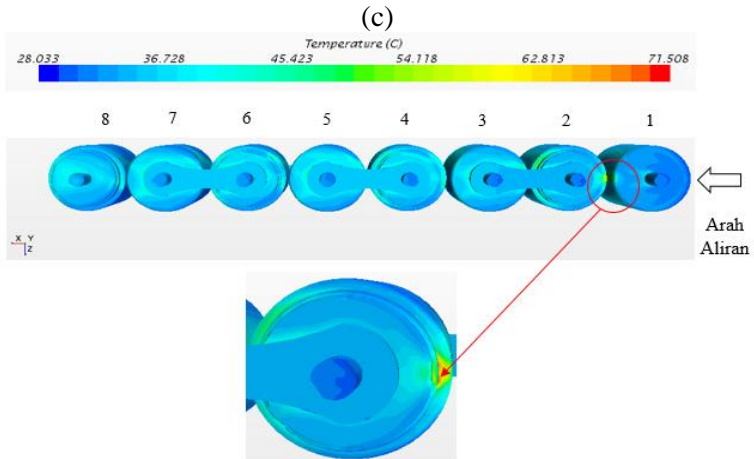
Gambar 4.18 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re 6000 (a) K- ϵ Standard (b) K- ϵ Realizable (c) K- ϵ Standard Low – Re





Gambar 4.19 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re 12000 (a) K- ϵ Standard (b) K- ϵ Realizable (c) K- ϵ Standard Low – Re

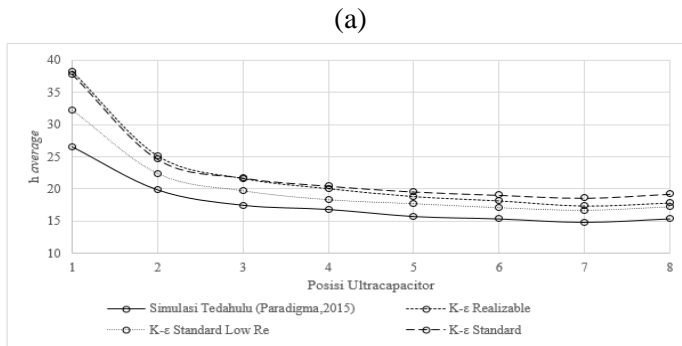


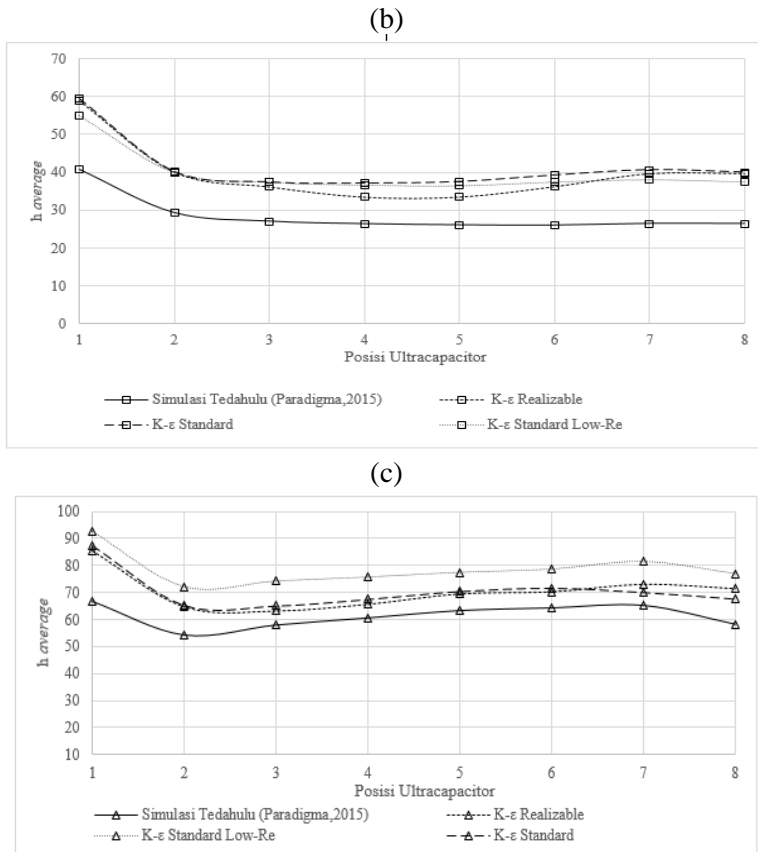


Gambar 4.20 Lokasi Daerah Temperatur Tertinggi pada Setiap Model Turbulensi dengan Arus Listrik 100A pada Bilangan Re 24000 (a) K- ϵ Standard (b) K- ϵ Realizable (c) K- ϵ Standard Low – Re

4.3.3 $h_{average}$ pada Setiap Sel *Ultracapacitor*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai nilai dari $h_{average}$ yang didapatkan pada setiap variasi dari nilai Re. Nilai dari $h_{average}$ yang didapatkan ini ditunjukkan dengan menggunakan grafik pada gambar 4.19. Nilai dari $h_{average}$ merupakan nilai yang didapatkan pada seluruh permukaan *ultracapacitor*.





Gambar 4.21 Grafik $h_{average}$ pada Arus Listrik 100A (a) Re 6000
(b) Re 12000 (c) Re 24000

Terdapat perbedaan antara nilai $h_{average}$ yang didapatkan pada penelitian dengan yang didapatkan dengan simulasi terdahulu. Perbedaan dengan simulasi terdahulu ditampilkan dalam persen selisih yang dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Persen Selisih Rata-Rata Nilai h *average* terhadap Simulasi Terdahulu (Paradigma,2015)

Model Turbulensi	Nilai Re_D		
	6000	12000	24000
K- ϵ <i>Standard</i>	26.40%	45.15%	15.29%
K- ϵ <i>Realizable</i>	23.26%	38.74%	14.84%
K- ϵ <i>Standard Low-Re</i>	13.03%	39.87%	28.42%

Dari ketiga model turbulensi, untuk bilangan Re rendah maka yang terbaik adalah model K- ϵ *Standard Low-Re*, sedangkan untuk bilangan Re yang tinggi model yang terbaik adalah K- ϵ *Realizable*, sedangkan untuk model K- ϵ *Standard Low-Re* memiliki persen selisih yang besar bila digunakan sehingga buruk.

Nilai dari koefisien perpindahan panas konveksi (h) menunjukkan laju perpindahan panas secara konveksi. Konveksi adalah perpindahan panas yang disertai dengan perpindahan oleh medium perantaranya, pada hal ini yang terjadi perpindahan panas secara konveksi adalah aliran udara. Aliran pendingin pertama kali melewati *cell number 1*. Fenomena aliran melewati sel nomor 1. Aliran mengalir melewati *frontal area ultracapacitor*, sehingga seluruh daerah tersebut dilingkupi aliran. Ketika aliran melewati *frontal area*, aliran mengalami peningkatan kecepatan. Kemudian aliran akan mengalami separasi dibagian belakang *ultracapacitor* karena momentum aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient*.

Aliran pendingin akan menuju *ultracapacitor cell number 2* setelah terseparasi dari *cell number 1*. Aliran tidak mampu masuk ke celah diantara *cell number 1* dan 2 karena momentum yang dimiliki tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang ada. Akibatnya aliran akan *reattach* pada permukaan sisi samping *ultracapacitor cell number 2* dan akan kembali terseparasi

pada bagian belakang *ultracapacitor*. Fenomena itu akan terus terjadi hingga *ultracapacitor cell number* 8, dimana penurunan nilai h dikarenakan *wake region* yang besar pada daerah di belakang *ultracapacitor* pertama sehingga pada *ultracapacitor* yang tersisa berada pada *wake region* akibat dari yang pertama. Pada nilai Re yang tertinggi, nilai dari koefisien perpindahan panas naik pada daerah belakang setelah mengalami penurunan pada sel nomor 2 disebabkan pada bilangan Re yang semakin tinggi *wake region* yang terbentuk dari *ultracapacitor* pertama semakin kecil. Pada bilangan Reynolds yang semakin besar maka momentum aliran akan semakin besar sehingga dapat membuat aliran *re-attach* pada permukaan *ultracapacitor*

Nusselt Number merupakan perbandingan antara perpindahan secara konveksi terhadap perpindahan konduksi murni. Nusselt Number adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan ukuran dari besar perpindahan panas konveksi pada suatu permukaan. Nilai dari koefisien perpindahan panas konveksi (h) akan mempengaruhi nilai dari Nusselt Number (Nu). Semakin besar nilai dari h maka nilai dari Nu akan semakin besar. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini:

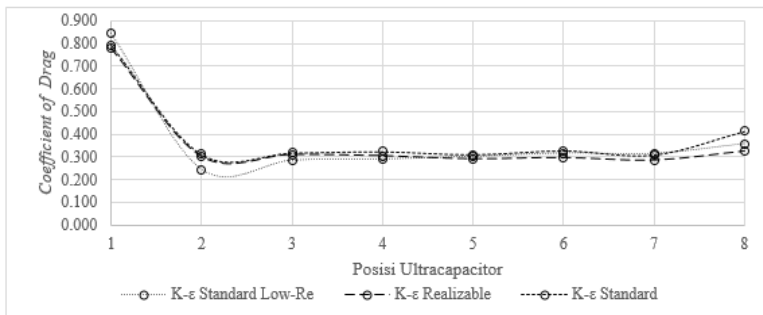
$$Nu = \frac{hD}{K_f}$$

4.3.4 Cd pada Setiap Sel *Ultracapacitor*

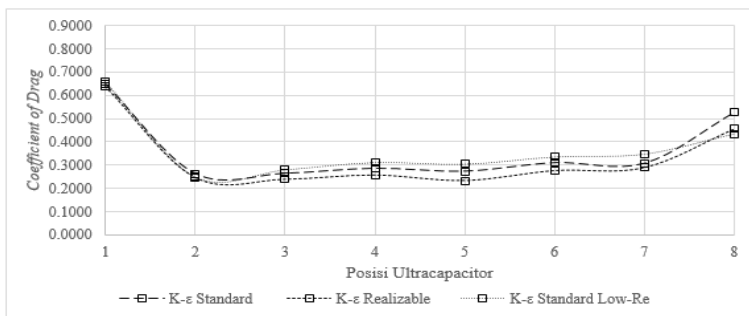
Drag adalah komponen dari gaya yang bekerja pada suatu bodi yang memiliki arah yang sejajar dengan arah aliran. *Drag* pada penelitian ini diambil pada *projected area* pada *ultracapacitor* pertama karena aliran mengenai bidang tersebut paling pertama. Besar luasan dari *projected area* pada penelitian ini adalah 0.003476 m^2 . *Drag* pada suatu bodi disebabkan oleh 2 hal, yaitu tekanan dan gaya gesek. Koefisien *drag* pada suatu aliran yang melewati bodi bergantung pada frontal area yang dilalui. Pada aliran dengan nilai $Re \ 10^3 < Re < 3 \times 10^5$, penyebab yang lebih

dominan untuk menghasilkan gaya *drag* adalah tekanan seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.7. Aliran yang mengalami *laminar boundary layer* akan terseparasi pada sudut ($\theta < 90^\circ$) karena momentum dari aliran tidak dapat menahan tegangan geser yang terjadi antara fluida dan bodi, sehingga aliran terseparasi lebih cepat dan daerah *wake* yang tercipta lebih besar. Daerah *wake* merupakan daerah yang bertekanan rendah sehingga akan terjadi back flow dimana terjadi *adverse pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} > 0$). Akibat dari *backflow* ini aliran pada daerah belakang akan bergerak melawan arah aliran sehingga menghambat aliran yang datang. Dari data C_d juga dapat menunjukkan pola aliran yang melewati sebuah bodi. C_d pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.20.

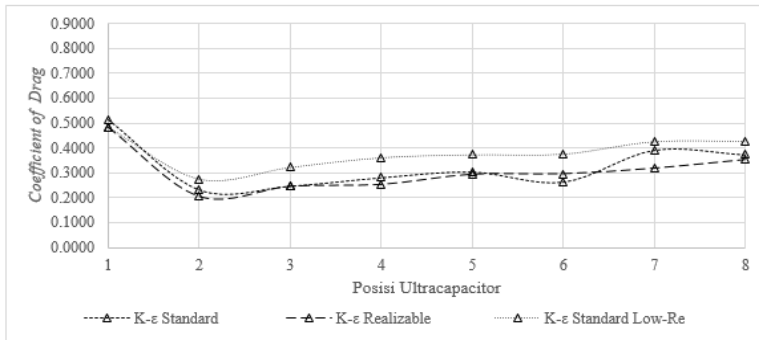
(a)



(b)



(c)



Gambar 4.22 Grafik C_d pada Arus Listrik 100A (a) Re 6000 (b) Re 12000 (c) Re 24000

Pada grafik yang didapatkan pada gambar 4.9 nilai dari C_d yang tertinggi didapatkan pada sel nomor 1 pada ketiga model turbulensi. Ketiga model ini memiliki tren kurva yang sama, walaupun terdapat perbedaan nilai yang cukup besar pada Re 6000 dan 12000. Pada Re 24000 terdapat perbedaan posisi nilai C_d tertinggi dimana pada penelitian yang dilakukan oleh Paradigma berada pada sel nomor 8, sedangkan pada model turbulensi K- ϵ *Standard* dan K- ϵ *Standard Low – Re* memiliki kurva dan posisi C_d tertinggi yang berbeda. Pada kedua model ini letak C_d tertinggi berada pada sel nomor 1. Untuk model turbulensi K- ϵ *Realizable* memiliki tren kurva yang sama serta lokasi C_d tertinggi yang sama.

Nilai dari C_d yang semakin tinggi menandakan separasi yang terjadi lebih cepat dan memiliki daerah *wake* yang besar, yaitu pada sel nomor 1. Selanjutnya pada sel nomor 2 aliran akan berusaha untuk *attach* dimana hal ini ditunjukkan pada nilai C_d yang menurun dan cenderung konstan pada daerah belakang.

Perbedaan nilai yang didapatkan dari hasil penelitian dengan simulasi terdahulu akan ditampilkan dalam persen selisih yang disajikan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Persen Penyebab Drag

K- ε Realizable Re 6000				
Total	Pressure	Shear	persen pressure	persen shear
0.7819	0.6967	0.0852	89.100%	10.900%
0.3014	0.2507	0.0507	83.183%	16.817%
0.3106	0.2625	0.0481	84.518%	15.482%
0.3047	0.2581	0.0466	84.713%	15.287%
0.2909	0.2454	0.0455	84.351%	15.649%
0.2965	0.2511	0.0454	84.681%	15.319%
0.2851	0.2406	0.0445	84.377%	15.623%
0.3254	0.2754	0.0500	84.633%	15.367%

K- ε Realizable Re 12000				
Total	Pressure	Shear	persen pressure	persen shear
0.641	0.579	0.062	90.315%	9.685%
0.247	0.211	0.036	85.360%	14.640%
0.239	0.204	0.035	85.510%	14.489%
0.257	0.224	0.034	86.956%	13.044%
0.234	0.200	0.034	85.538%	14.462%
0.277	0.241	0.035	87.201%	12.799%
0.289	0.252	0.038	86.998%	13.002%
0.456	0.410	0.046	89.832%	10.168%

K- ε Realizable Re 24000				
Total	Pressure	Shear	persen pressure	persen shear
0.4808	0.4373	0.0435	90.953%	9.047%
0.2055	0.1799	0.0256	87.549%	12.451%
0.2461	0.2207	0.0253	89.706%	10.294%
0.2535	0.2279	0.0256	89.917%	10.083%
0.2943	0.2668	0.0275	90.649%	9.352%
0.2961	0.2681	0.0280	90.549%	9.451%
0.3182	0.2887	0.0295	90.729%	9.271%
0.3528	0.3185	0.0342	90.298%	9.702%

Perbedaan nilai yang didapatkan cukup besar terutama pada Re_D 12000 pada model K- ε *Standard Low-Re*. Untuk persen selisih

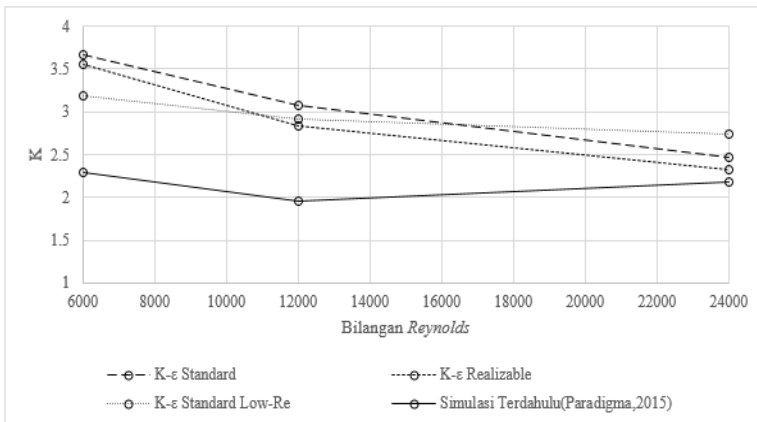
terkecil pada semua variasi Re_D didapatkan pada model turbulensi $K-\varepsilon$ *Realizable*.

4.3.5 Koefisien *Losses* (K) pada Setiap *Ultracapacitor*

Koefisien *Losses* (K) merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang berfungsi untuk mengetahui nilai *pressure drop* dari suatu aliran yang melewati suatu benda. Dengan mengetahui nilai dari K dapat diketahui daya minimum dari kipas yang digunakan pada penelitian ini. Nilai K yang didapatkan pada penelitian ini dihitung berdasarkan persamaan:

$$K = \frac{\Delta P_{rata-rata}}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Nilai dari tekanan rata –rata diambil pada posisi $\frac{1}{3} D$ sebelum *ultracapacitor cell number* 1 dan pada posisi $\frac{3}{4} D$ setelah *ultracapacitor cell number* 8. Dari kedua tekanan rata-rata tersebut akan dihitung selisihnya. Hasil dari nilai K ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.21

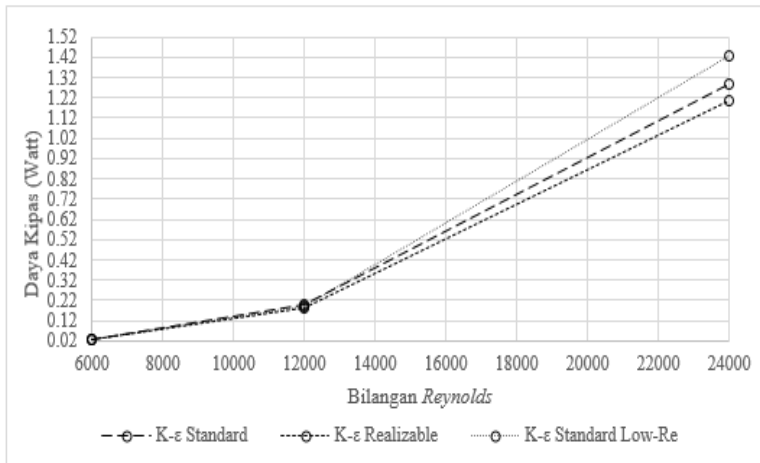


Gambar 4.23 Nilai K pada Arus Listrik 100A

Dari hasil yang didapatkan, seiring dengan meningkatnya nilai dari bilangan Reynolds nilai dari koefisien *losses* semakin kecil. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka momentum aliran akan semakin besar sehingga mampu menahan tegangan geser lebih lama yang menyebabkan separasi tertunda pada bagian belakang. Akibat dari separasi yang tertunda *wake* menjadi semakin kecil dan aliran dapat melewati celah sempit diantara *ultracapacitor* sehingga nilai dari *pressure drop* semakin turun.

Selain itu, koefisien loss juga mempengaruhi daya kipas. Semakin besar *pressure drop* maka daya kipas yang dibutuhkan untuk menghasilkan debit yang sama akan semakin besar, sehingga konsumsi energi pun meningkat. Daya kipas yang dibutuhkan ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.22. Daya yang dibutuhkan oleh kipas karena adanya *pressure drop* adalah sebagai berikut:

$$\dot{W} = \Delta P \cdot \dot{V}$$



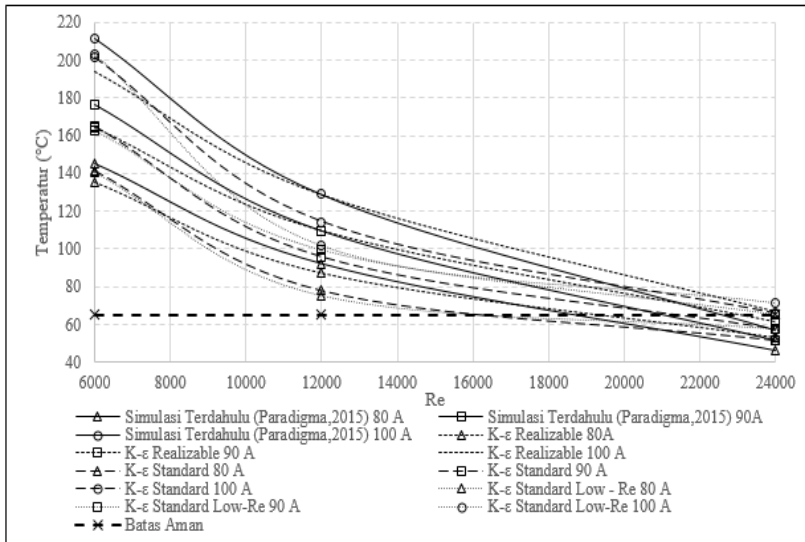
Gambar 4.24 Perbandingan Daya Kipas Arus Listrik 100A pada Setiap Variasi Re

4.4 Perbandingan Variasi Arus Listrik Terhadap Pendinginan *Ultracapacitor*

Pada gambar 4.23 menunjukkan hasil dari penelitian dengan model turbulensi pada penelitian ini terhadap penelitian terdahulu dari Paradigma. Pada subbab ini, akan dilakukan perbandingan T_{maks} pada seluruh sistem dengan seluruh variasi arus listrik 80A, 90A dan 100A serta seluruh variasi bilangan Re 6000, 12000 dan 24000. T_{maks} yang diambil adalah temperatur maksimum pada seluruh permukaan *ultracapacitor*.

Tabel 4.8 Perbandingan T_{maks} dengan Variasi Arus Listrik dan Bilangan Re terhadap Simulasi Terdahulu

80 A	Nilai Bilangan Re	T_{maks} Simulasi Terdahulu (Paradigma, 2015)	T_{maks} (K- ε Realizable)	T_{maks} (K- ε Standard)	T_{maks} (K- ε Standard Low- Re)
	Re = 6000	145.2157	135.6856	141.6651	140.9429
	Re = 12000	92.2323	87.15774	77.95473	75.29014
	Re = 24000	46.2469	52.7823	51.53105	57.68772
90 A	Nilai Bilangan Re	T_{maks} Simulasi Terdahulu (Paradigma, 2015)	T_{maks} (K- ε Realizable)	T_{maks} (K- ε Standard)	T_{maks} (K- ε Standard Low- Re)
	Re = 6000	176.6729	164.1279	165.093	162.8116
	Re = 12000	109.5274	109.5556	95.92138	99.5647
	Re = 24000	51.3471	61.32134	57.66845	65.42934
100 A	Nilai Bilangan Re	T_{maks} Simulasi Terdahulu (Paradigma, 2015)	T_{maks} (K- ε Realizable)	T_{maks} (K- ε Standard)	T_{maks} (K- ε Standard Low- Re)
	Re = 6000	211.6122	193.8228	201.3978	203.3515
	Re = 12000	128.9097	128.5523	114.3882	101.7974
	Re = 24000	57.0618	66.55266	65.71887	71.50816



Gambar 4.25 Grafik Perbandingan T_{maks} terhadap Re

Nilai Temperatur maksimum yang ditunjukkan pada gambar 4.12 akan semakin turun dengan bertambahnya Re pada saat *heat flux* konstan. Hal ini telah sesuai karena semakin besar Re maka nilai koefisien konveksi akan semakin besar, sehingga laju perpindahan panas dari *ultracapacitor* ke fluida akan meningkat. Meningkatnya laju perpindahan panas ini akan menurunkan temperatur pada *ultracapacitor*. Berdasarkan persamaan $h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{freestream})}$, maka h akan berbanding terbalik dengan temperatur.

Pada hasil dari penelitian yang dilakukan terdapat perbedaan nilai temperatur maksimum terhadap penelitian yang dilakukan Paradigma, namun seluruh kurva dari ketiga model turbulensi memiliki tren yang sama. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini rata - rata memiliki nilai yang lebih rendah, kecuali pada nilai Re 24000

Nilai yang lebih rendah dapat diakibatkan pada model turbulensi K- ϵ *Realizable*, nilai C_μ tidaklah bersifat konstan tetapi merupakan fungsi dari kecepatan rata – rata aliran dan properti turbulensi. Akibat dari nilai C_μ yang tidak konstan dapat menyebabkan separasi aliran tertunda saat melewati bodi *ultracapacitor*, padahal hal tersebut dapat menjadi kurang tepat. Nilai dari C_μ mempengaruhi nilai dari *turbulent kinetic energy* (TKE). Dari TKE akan mempengaruhi gaya geser pada kontak antara fluida dan permukaan benda yang dilalui. Gaya geser akan diubah menjadi energi panas, bila aliran telah terseparasi maka aliran akan kehilangan energi untuk bergerak sehingga gesekan tidak lagi terjadi dan kenaikan temperatur tidak setinggi seharusnya. Hal ini dapat disebabkan pemerataan dan kerapatan dari mesh pada dinding *ultracapacitor*, bila terjadi pemerataan mesh yang kurang baik seperti memiliki *skewness* yang tinggi dapat menyebabkan perhitungan menjadi kurang akurat, seperti pada kasus ini dimana temperatur maksimum dari *ultracapacitor* menjadi lebih rendah dari yang seharusnya.

Batas aman dari temperatur kerja *ultracapacitor* adalah 65°C. Dari data tersebut menandakan bahwa kecepatan kipas yang berfungsi mendinginkan susunan *ultracapacitor* harus dapat menjaga temperatur *ultracapacitor* di bawah temperatur kritis tersebut. Pada arus listrik 80A dan 90A untuk kecepatan yang dapat temperatur kerjanya tetap aman berada pada kecepatan dengan bilangan Re 24000, namun pada model turbulensi K- ϵ *Standard Low* – Re pada nilai Re 24000 untuk arus listrik 90A berada pada ambang batas atas temperatur kerja dari *ultracapacitor*. Pada arus listrik 100A tidak ada dari ketiga model turbulensi yang menyatakan aman. Pada model turbulensi K- ϵ *Standard* dan K- ϵ *Realizable* berada pada ambang batas atas temperatur kerja *ultracapacitor*, sedangkan pada model K- ϵ *Standard Low* – Re didapatkan hasil yang tidak aman. Paradigma dimana hasil yang didapatkan oleh Paradigma bahwa variasi Re 24000 dapat mempertahankan batas aman temperatur untuk semua variasi arus listrik.

Untuk hasil yang didapatkan pada parameter lain seperti temperatur rata – rata, koefisien perpindahan panas konveksi dan C_d setiap sel cukup identik dengan hasil yang didapatkan pada arus listrik 100A. Hasil dalam bentuk grafik dapat dilihat pada halaman lampiran.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang didapatkan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada grafik perbandingan T_s hasil penelitian dengan eksperimen pada Re 10000 memiliki perbedaan pada *ultracapacitor* 1 yang cukup besar, namun pada posisi belakang memiliki kurva yang berhimpit dengan model yang paling mendekati adalah $K-\epsilon$ *Realizable*. Namun untuk pengukuran T_c dan T_f model yang paling mendekati adalah $K-\epsilon$ *Standard Low - Re*
2. Penggunaan dari model turbulensi $K-\epsilon$ *Standard Low - Re* baik untuk digunakan pada bilangan *Reynolds* rendah, sedangkan untuk bilangan *Reynolds* tinggi direkomendasikan menggunakan $K-\epsilon$ *Realizable*
3. Dari ketiga model turbulensi, $K-\epsilon$ *Standard Low - Re* memiliki tren kurva yang sama dengan simulasi terdahulu, namun pada bilangan Re yang tinggi terjadi perbedaan nilai yang cukup besar.
4. Dari ketiga model turbulensi yang digunakan pada *software* Star CCM+ cocok untuk bilangan *Reynolds* rendah dimana hasil pada bilangan *Reynolds* rendah mendekati hasil simulasi sebelumnya.
5. *Ultracapacitor* yang digunakan dapat bekerja secara aman pada arus listrik 80A dan 90A pada bilangan *Reynolds* 24000. Namun pada model turbulensi $K-\epsilon$ *Standard Low - Re* hasil yang didapatkan berada pada ambang atas batas temperatur kerja.
6. Pada arus listrik 100A didapatkan hasil tidak aman bekerja pada bilangan *Reynolds* tertinggi.
7. Dari variasi bilangan *Reynolds* memiliki pengaruh yang signifikan pada setiap parameter yang ditinjau,

sedangkan pada variasi arus listrik hanya mempengaruhi nilai dari temperatur.

5.2 Saran

Adapun saran untuk pengembangan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perbaikan untuk mesh yang digunakan adalah *structured mesh*.
2. Peletakkan *thermocouple* pada saat melakukan eksperimen dapat dicoba diletakkan pada daerah temperatur tertinggi agar dapat divalidasi untuk hasil simulasi yang dilakukan.
3. Perlu dipelajari lebih lanjut mengenai fluida pendingin yang dapat digunakan selain udara untuk mendapatkan hasil pendinginan yang lebih efektif
4. Perlu dilakukan desain pada sistem pendingin yang lebih baik agar tidak terjadi *overheat* pada susunan *ultracapacitor*

DAFTAR PUSTAKA

- Alciatore, David G., Hiestand, Michael B. 2011. *Introduction to Mechatronics*, 4th edition. Mc-Graw-Hill, New York, USA.
- Al Sakka M., Gualous, H., Mierlo, Joeri Van. 2009. “*Thermal Modeling and Heat Management of Supercapacitor Modules for Vehicle Applications*”. **Journal of Power Sources**, 194: 581-587.
- Buyruk, E. 2002. “*Numerical Study of Heat Transfer Characteristics on Tandem Cylinders, Inline and Staggered Tube Banks in Cross - Flow of Air*”. University of Cumhuriyet, Turkey.
- CD-Adapco. 2014. *Star CCM + v9.02 User Guide*. Siemens, Munchen, Germany.
- Fox, Robert W., McDonald, Alan T., Pritchard, Philip J. 2010. *Introduction to Fluid Mechanics*, 7th edition. John Wiley & Sons, USA.
- Gidwani., Bhagwani, Anand., Rohra, Nikhil. 2014. “*Supercapacitor: The Near Future of Batteries*”. Department of Computer Engineering, India.
- Gualous, H., Louahlia-Gualous H., Gallay R., Miraoui A. 2009. “*Supercapacitor Thermal Modeling and Characterization in Transient State for Industrial Application*”. **IEEE Transactions on Industry Application**
- Hijazi, Alaa., Pascal, Venet., Eric, Bideaux., Michael, Loreto. 2012. “*Thermal network model of supercapacitor stack*”. *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, France.
- Incropera, Frank P., DeWitt, David P., Bergman., Lavine, Adrienne S. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edition. John Wiley & Sons, USA.

Lystianingrum, Vita., Hredzak, Brainslav., Agelidis, Vassilios G., Djanali, Vivien S. 2015. “*On Estimating Instantaneous Temperature of a Supercapacitor String Using an Observer Based on Experimentally Validated Lumped Thermal Model*”. **IEEE Transactions on Industry Application**

Kalkan, Onur Ozan. 2014. “*Implementation of K-Epsilon Turbulence Model In a Two Dimensional Parallel Navier-Stokes Solver On Hybrid Grids*”. Middle East Technical University, Ankara, Turkey.

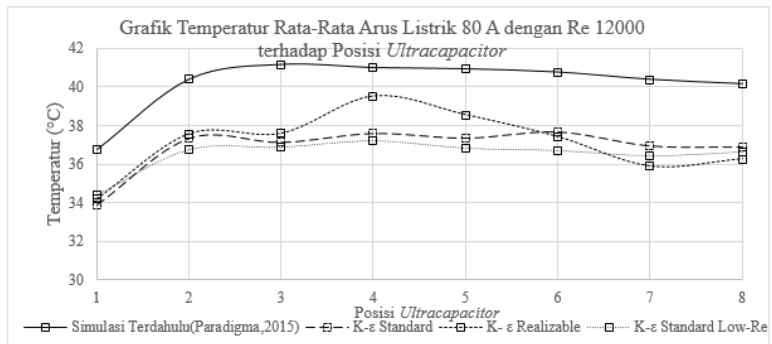
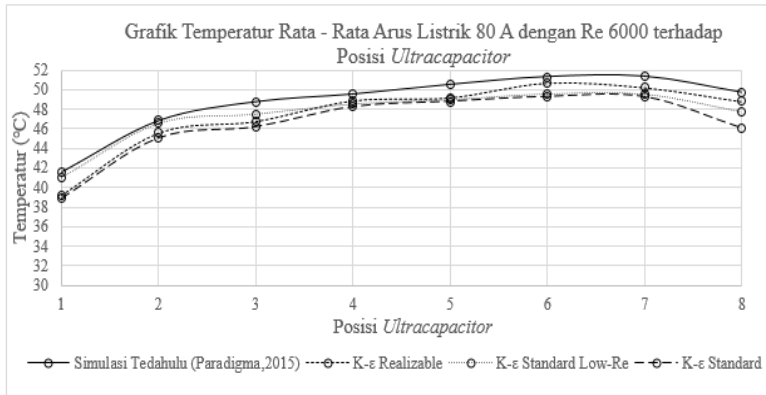
Paradigma, Nana. 2015. “Studi Numerik Analisis Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas pada Susunan Ultracapacitor dengan *Forced Air Cooling* “. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

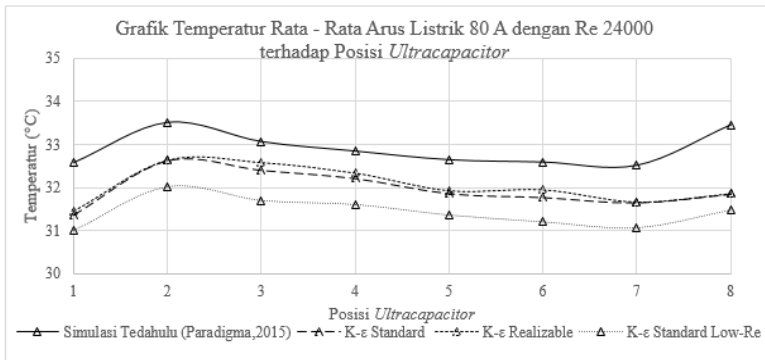
Versteeg, H.K., Malalasekera W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman, England

Xia, Zhengpeng., Chenquan Zhou., Shen Dan., Ni Hongjun., Yuan Yinnan., Ping Liao. 2014. “*Study on the Cooling System of Supercapacitor for Hybrid Electric Vehicle*”. Nantong University, Nantong.

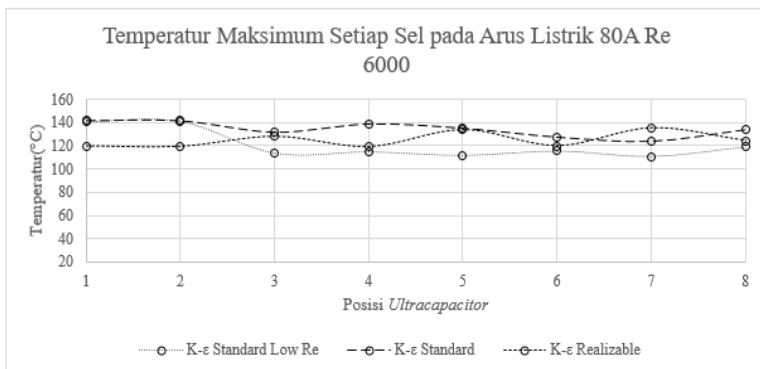
LAMPIRAN

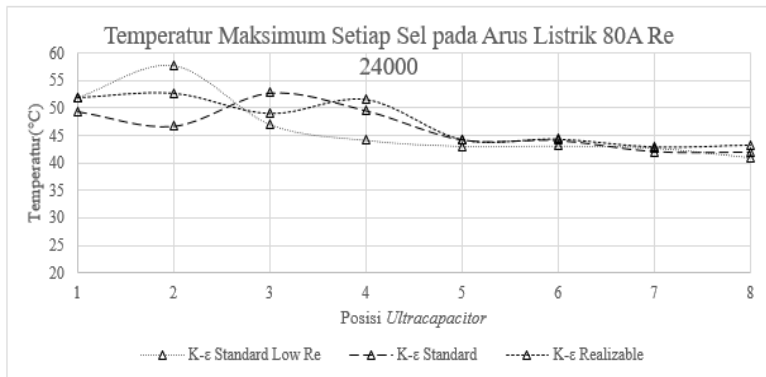
A.1 Grafik Temperatur Rata-Rata Arus Listrik 80A



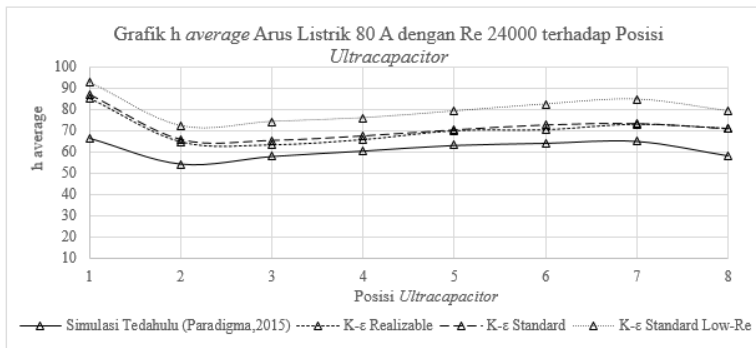
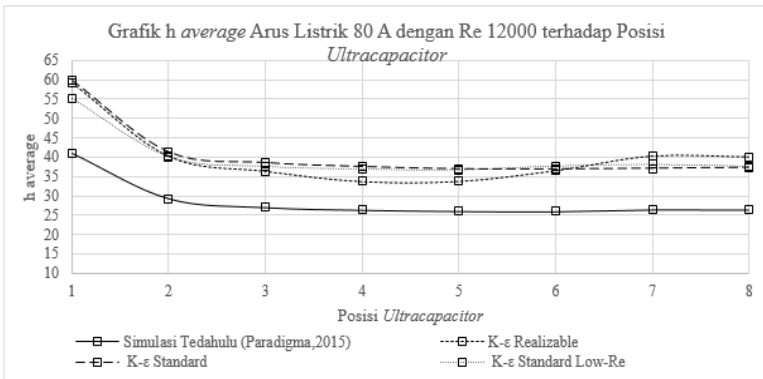
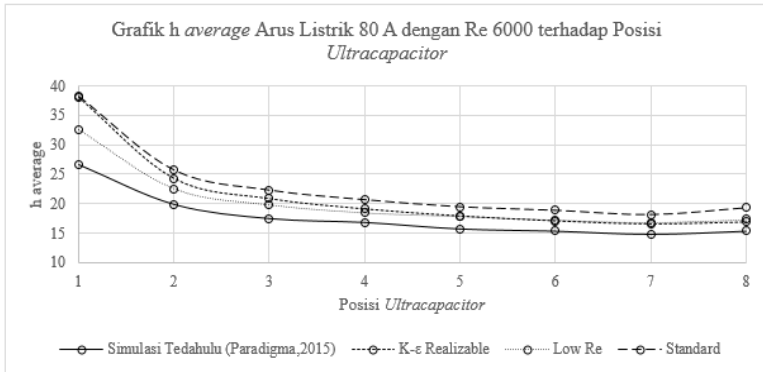


A.2 Grafik Temperatur Maksimum Arus Listrik 80A

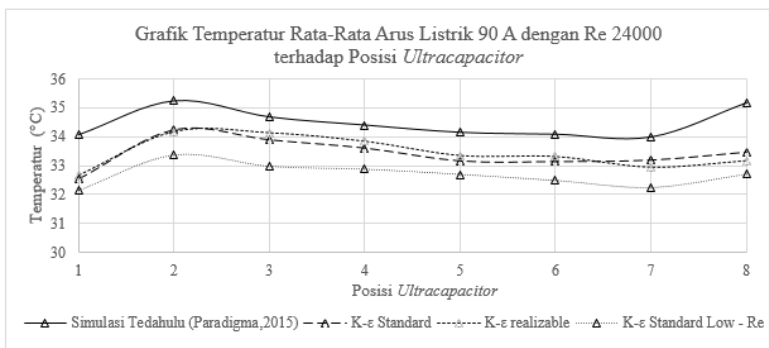
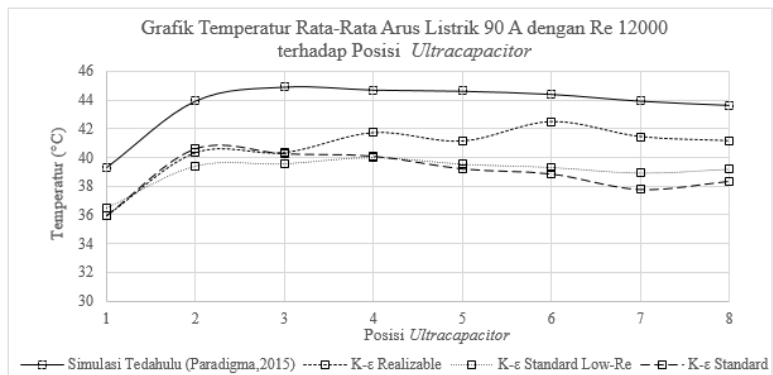
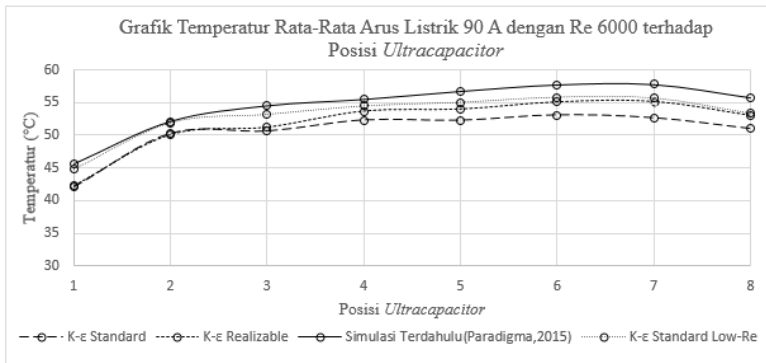




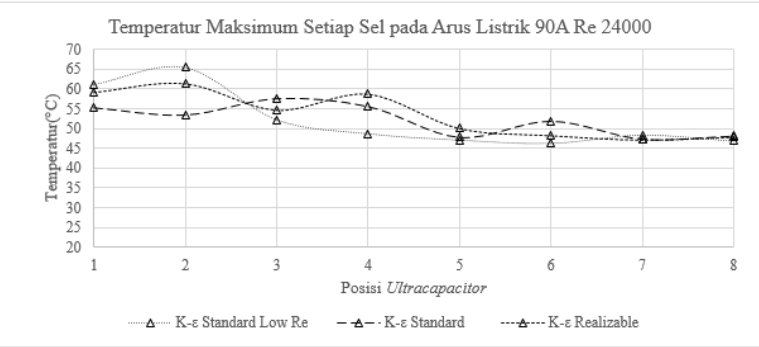
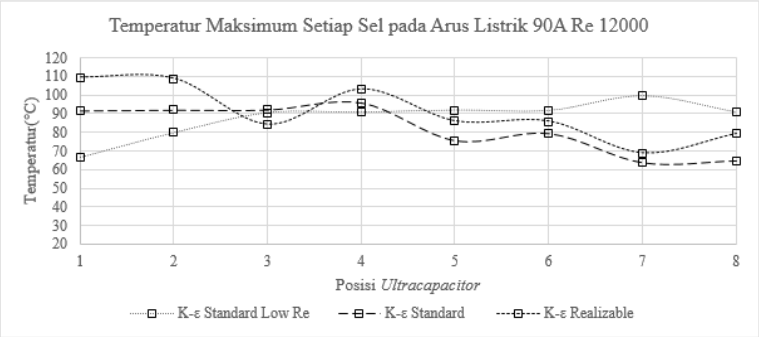
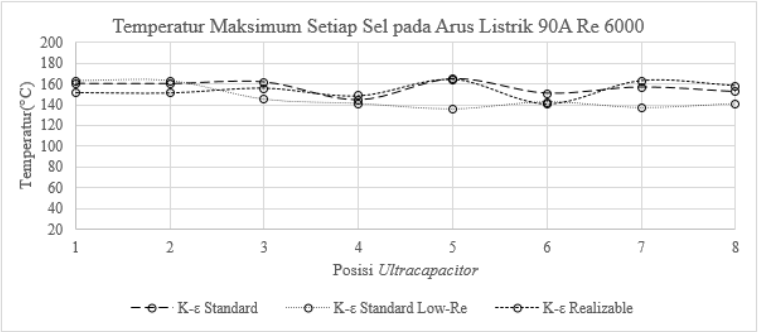
A.3 Grafik h_{average} Arus Listrik 80A



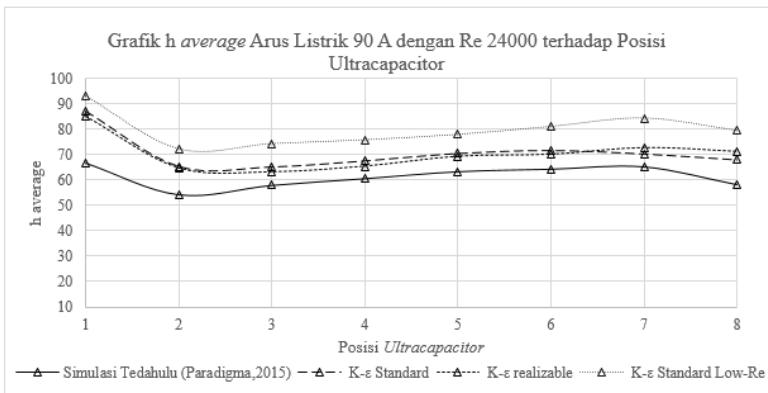
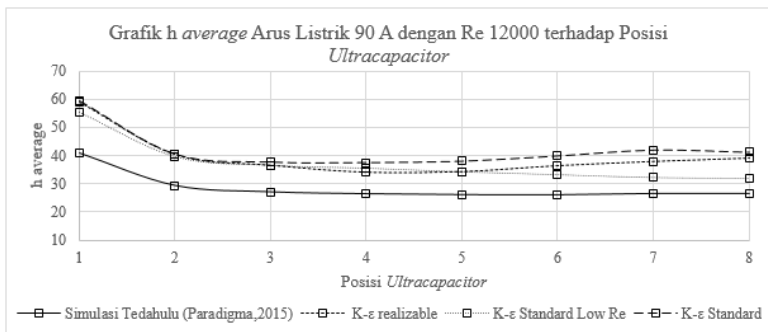
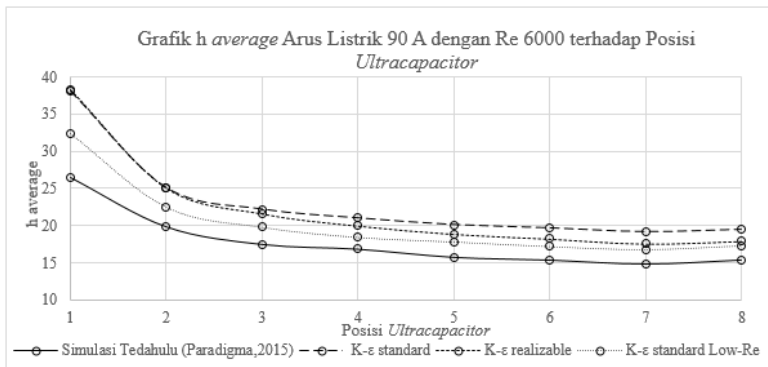
A.4 Grafik Temperatur Rata - Rata Arus Listrik 90A



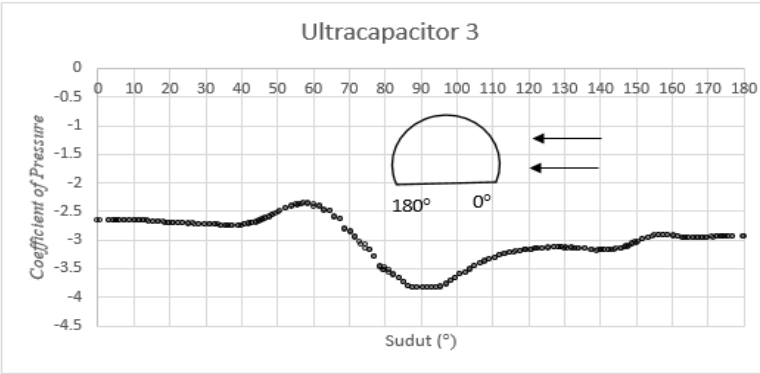
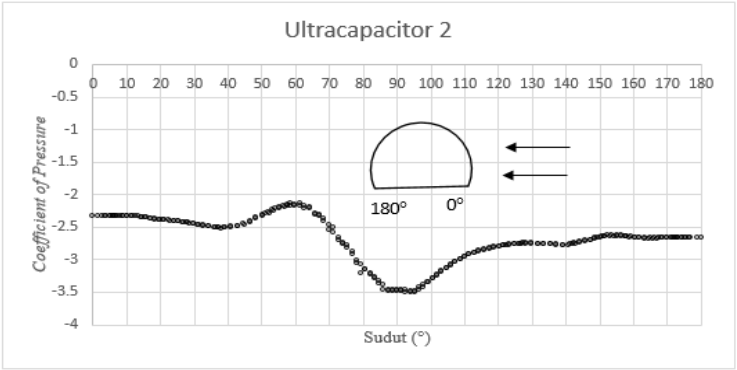
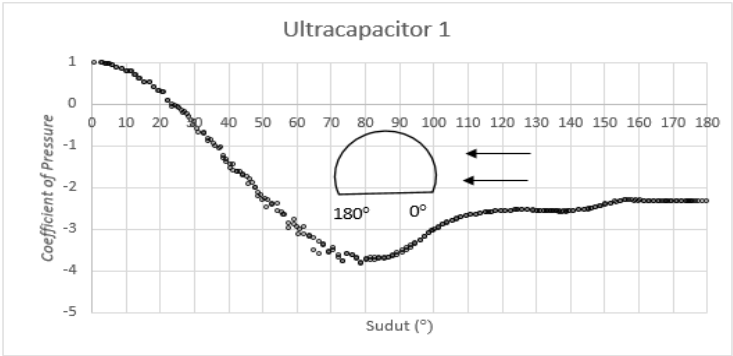
A.5 Grafik Temperatur Maksimum Arus Listrik 90A



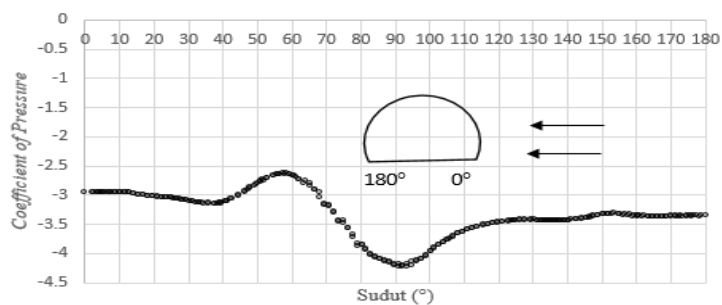
A.6 Grafik $h_{average}$ Arus Listrik 90A



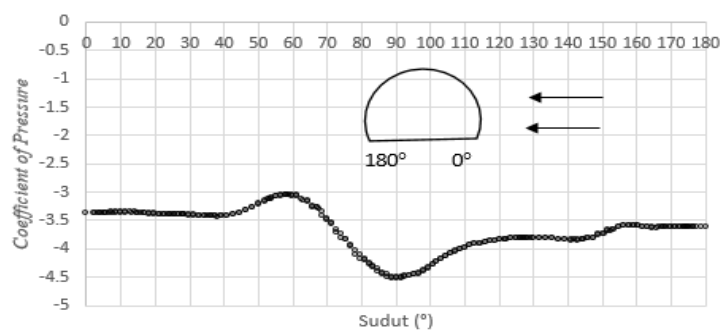
A.7 Coefficient of Pressure Arus Listrik 85A Re 10000



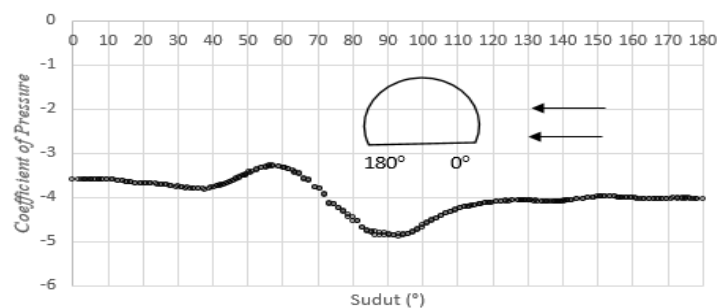
Ultracapacitor 4

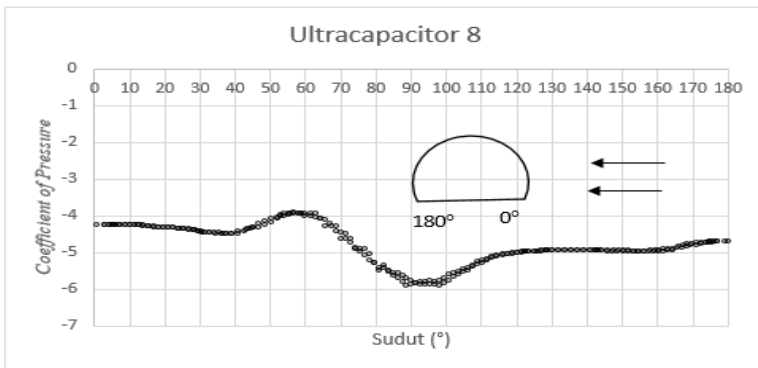
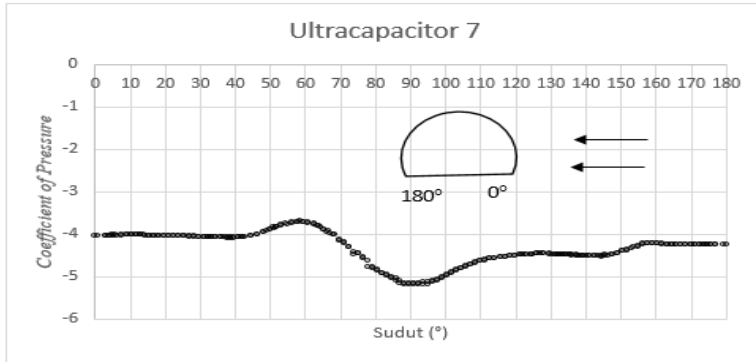


Ultracapacitor 5

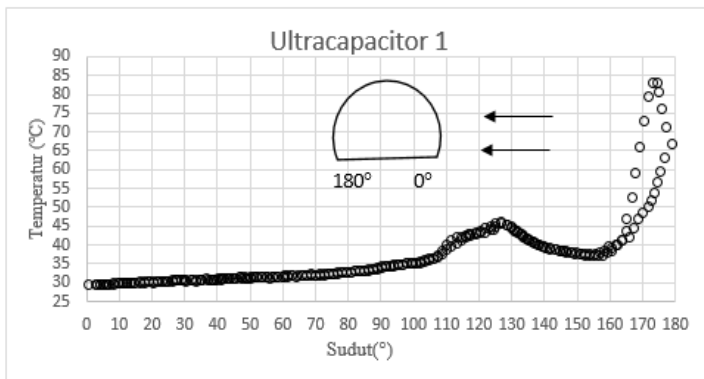


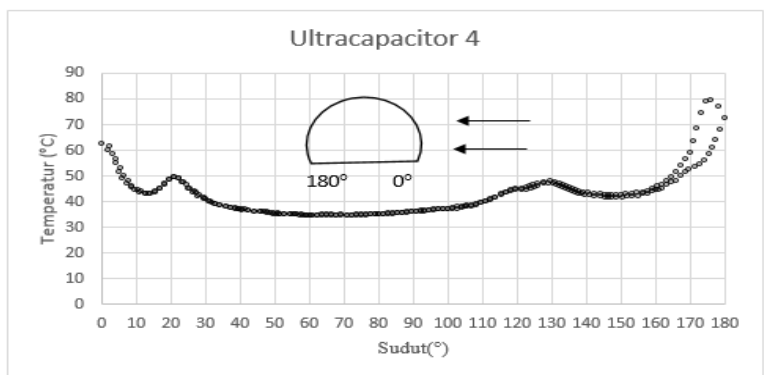
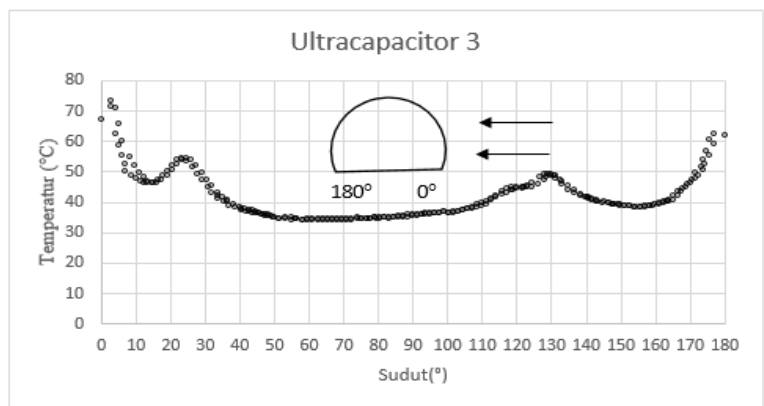
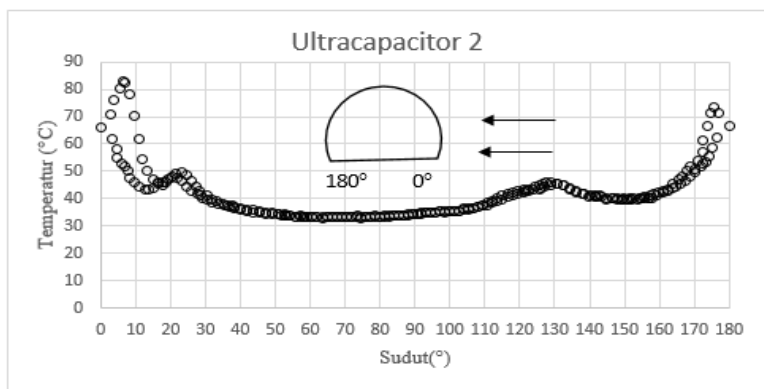
Ultracapacitor 6



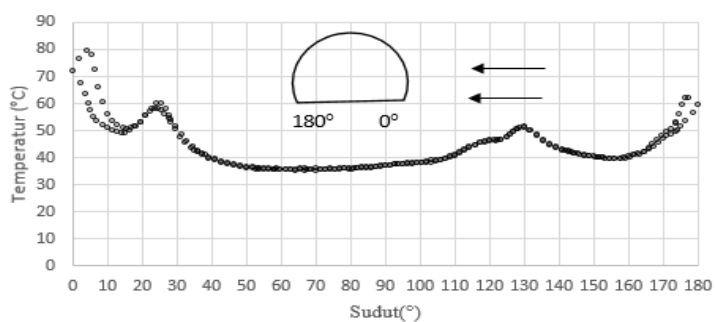


A.8 Distribusi Temperatur Arus Listrik 85 Re 10000

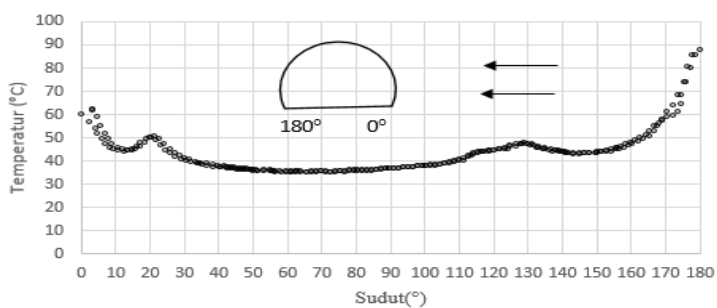




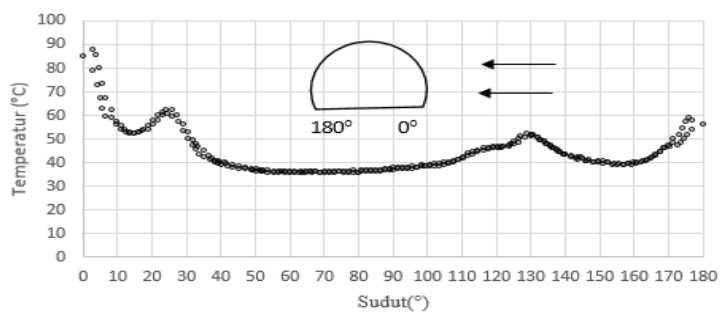
Ultracapacitor 5

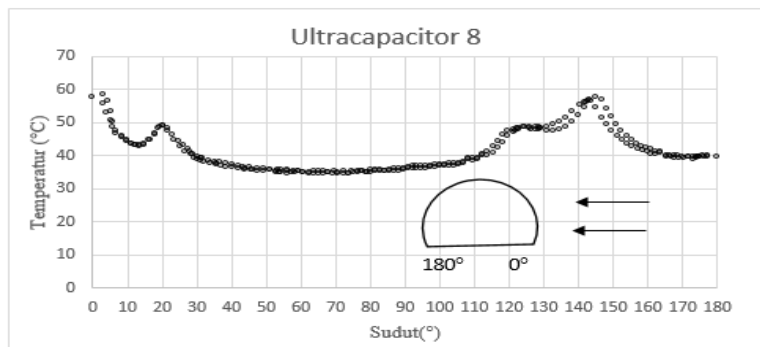


Ultracapacitor 6

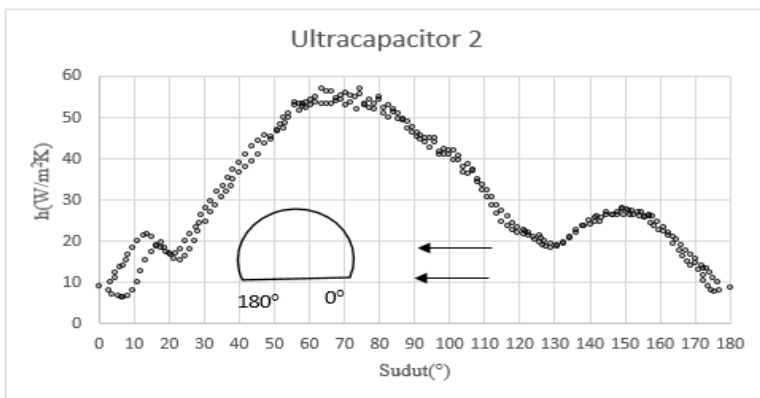
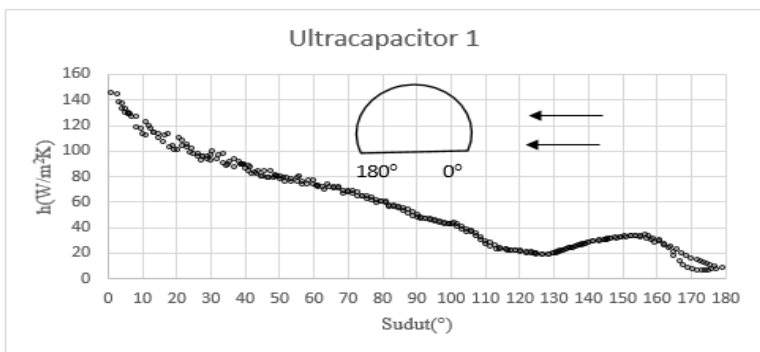


Ultracapacitor 7

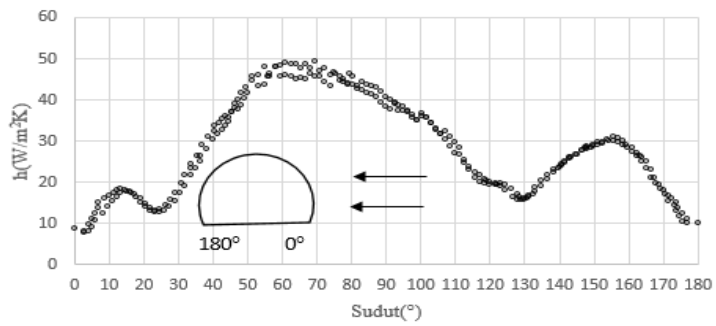




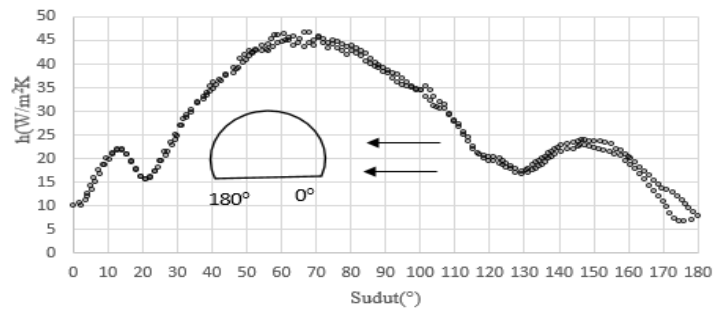
A.9 Distribusi h Arus Listrik 85 Re 10000



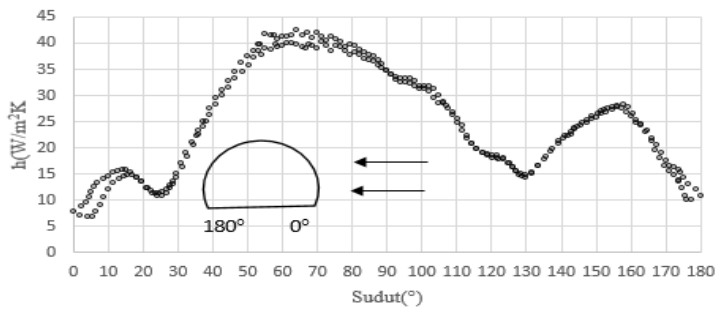
Ultracapacitor 3



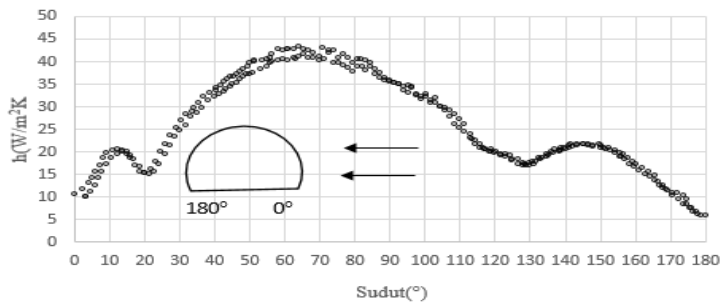
Ultracapacitor 4



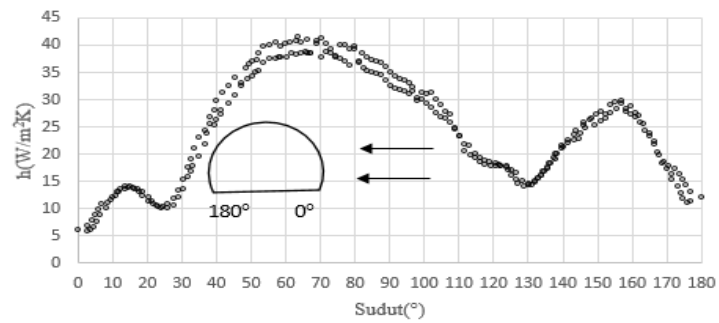
Ultracapacitor 5



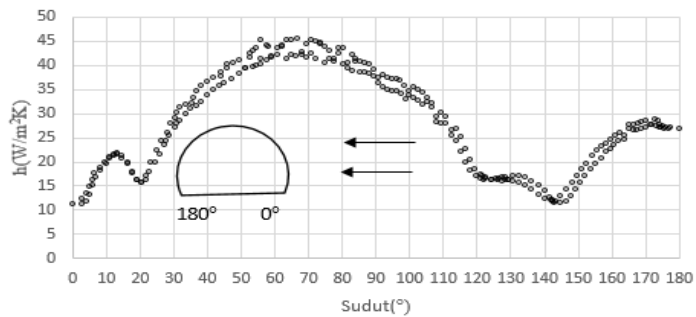
Ultracapacitor 6



Ultracapacitor 7



Ultracapacitor 8



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Christopher Gunawan lahir di Surabaya, pada tanggal 21 April 1996. Penulis merupakan anak ketiga dari ketiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Kristus Raja I Sorong. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP YPPK St. Don Bosco Sorong untuk pendidikan menengah pertama dan menengah atas di SMAK St. Louis 1 Surabaya. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember departemen Teknik Mesin pada tahun 2013.

Semasa kuliah, penulis aktif dalam kegiatan di kampus, seperti kepanitiaan di SPE-ITS, Staff Minat dan Bakat KMK ITS pada tahun kedua dan Kepala Biro Wirausaha KMK ITS pada tahun ketiga. Selain itu juga, penulis aktif dalam kegiatan laboratorium mekanika fluida dengan menjadi asisten praktikum.

